

ED n° 396 : Economie Organisation Société

N° attribué par la bibliothèque

|__|__|__|__|__|__|__|__|__|__|

T H E S E

pour obtenir le grade de
Docteur de l'Ecole des Mines de Paris
Spécialité "Economie et Finance"

présentée et soutenue publiquement par
Benoit LEFEVRE

le 12 Décembre 2007

La Soutenabilité Environnementale des Transports Urbains dans les Villes du Sud

Le couple « transport – usage des sols » au cœur des dynamiques urbaines

Directeur de thèse : M. Pierre-Noël GIRAUD

Jury

M.	Olivier Coutard	Examinateur
M.	Patrick Criqui	Rapporteur
M.	Yves Crozet	Examinateur
M.	Lee Schipper	Examinateur
M.	Vincent Renard	Rapporteur

ED n° 396 : Economie Organisation Société

T H E S E

pour obtenir le grade de
Docteur de l'Ecole des Mines de Paris
Spécialité "Economie et Finance"

présentée et soutenue publiquement par
Benoit LEFEVRE

le 12 Décembre 2007

La Soutenabilité Environnementale des Transports Urbains dans les Villes du Sud

Le couple « transport – usage des sols » au cœur des dynamiques urbaines

Jury

M. Olivier Coutard — Examinateur
Chargé de Recherche, CNRS, Ecole des ponts et chaussées
M. Patrick Criqui — Rapporteur
Directeur de Recherche, CNRS, Université de Grenoble
M. Yves Crozet — Examinateur
Professeur, CNRS, Université Lumière Lyon II
M. Pierre-Noël Giraud — Directeur
Professeur, Ecole des mines de Paris
M. Lee Schipper — Examinateur
Directeur de Recherche, EMBARQ, WRI
M. Vincent Renard — Rapporteur
Directeur de Recherche, CNRS, Ecole Polytechnique

Remerciements

Je remercie avant tout Pierre qui m'a offert ce sujet, m'a permis d'en déguster de nombreuses facettes et selon différents assaisonnements.

Je tiens à remercier tout particulièrement Dorly qui m'a apporté le sucre et le sel de ces années de thèse.

Je remercie vivement Marie-Jo, Jean-Marie, Yvette, Lexouille, Isa, Leslie et Coco qui ont veillé à la bonne cuisson.

Je remercie également John, Gab, Gopi, Maria Isabel, Vincent, Fernando, Alex, Béatrice, Tomas y la familia, Bernard, Philippe et toute l'équipe Orients Urbains qui m'ont appris à manier les subtilités des épices urbaines.

Toute ma reconnaissance à Vince, Flor, Lalitha, Bharat, Pedro y Roberto, à la planète malgache et à l'international montpel' pour avoir pimenté le tout.

En espérant que Nat et Sam apprécieront.

Bon appétit !

Plan général de la thèse

Partie 1

Chapitre 1 : Les déterminants des consommations énergétiques des transports urbains. Analyse de la littérature. 13

Chapitre 2 : Les moyens à la disposition des aménageurs urbains 53

Partie 2

Chapitre 3 : Les enseignements de l'histoire longue sur les relations fonctionnelles au sein du couple « transport – usage des sols » et leurs conséquences sur l'évolution de la structure urbaine 101

Chapitre 4 : Analyse des effets d'une infrastructure de Transport Rapide de Masse (le B.R.T. TransMilenio) sur la structure urbaine 167

Partie 3

Chapitre 5 : Evaluation des outils de simulation des interactions « transport – usage des sols ». Le choix de TRANUS et la construction de TRANUS-SETU 225

Chapitre 6 : Application de TRANUS-SETU à Bangalore, Inde 317

Sommaire détaillé

Introduction générale de la thèse ……..……..1

Chapitre 1 : Les déterminants des consommations énergétiques des transports urbains. Analyse de la littérature. ***13***

I - Les consommations énergétiques dans les transports urbains : une grande diversité qui ne s'explique pas par le PIB urbain **14**

A - Vue d'ensemble : une grande diversité des niveaux de consommations énergétiques dans les transports urbains 14

B - La richesse n'explique pas cette diversité 15

II - L'usage des sols, déterminant des consommations énergétiques dans les transports urbains **18**

A - Densité urbaine moyenne et répartition modale des déplacements, (Newman, Kenworthy,1999) 18

B - La densité moyenne n'est fonction ni de la richesse urbaine, ni de la taille de la population urbaine mais des politiques urbaines (Bertaud, 2003) 21

C - Le rôle de la distribution spatiale des densités sur les déplacements (Glachant, 2006 ; Fouchier, 1999) 22

D - Le rôle de la structure urbaine dans la détermination du mode de transport urbain dominant (Bertaud, 2001 ; 2003 ; 2004) 25

1) La distribution spatiale de la population 26

2) Le profil de densité 27

3) La distribution spatiale des déplacements 30

4) Les liens entre structure urbaine et efficacité des différents modes de transports : la compatibilité des structures urbaines avec des objectifs environnementaux. 33

a) Structure urbaine et longueur des déplacements 34

b) Compatibilité de la voiture avec de fortes densités : la disponibilité moyenne d'espace par habitant 36

c) Compatibilité des transports en commun avec différentes structures urbaines 37

III - Les technologies de transport successivement dominantes déterminent l'évolution de la structure urbaine et donc les consommations énergétiques des transports urbains (Schaeffer, 1975 ; Barter, 1999) **39**

A - La ville piétonne 39

B - La ville des transports en commun 40

C - La ville automobile 40

D - La ville bus 40

E - La ville motocycle 41

F - Conclusions 41

IV - Le couple « transport – usage des sols » au cœur de la structuration urbaine, et par là des consommations énergétiques dans les transports urbains **42**

V - Les tendances inquiétantes des processus de structuration urbaine **43**

VI - Une fatalité ? Non : Atlanta et Barcelone **45**

A - Atlanta, une urbanisation par étalement spatial 46

1) Une planification urbaine accompagnant l'expansion spatiale 46

2) La politique transport en faveur de l'automobile 47

B - Barcelone, une urbanisation planifiée 48

C - Conclusions 49

VII - Conclusions **50**

Chapitre 2 : Les moyens à la disposition des aménageurs urbains 53

I - Nécessité d'une planification urbaine d'anticipation et d'accompagnement centrée sur le couple « Transport – Usage des Sols » 53
A - De la recherche d'une forme urbaine idéale … 53
1) La forme urbaine énergétiquement idéale existe-t-elle ? 53
2) Les villes nouvelles, une solution pour soulager démographiquement les mégapoles ? 57
a) La ville nouvelle est-elle une solution accessible aux mégapoles pauvres ? 58
b) La ville nouvelle permet-elle de réduire les consommations énergétiques liées aux transports ? 60
B - … à un urbanisme d'anticipation et d'accompagnement du développement urbain 63
C - Une politique urbaine agissant sur le couple « transport – usage des sols » 64
D - Présentation des deux branches de la tenaille 66

II - Les politiques visant à accroître la soutenabilité environnementale de l'offre de transport urbain 69
A - Améliorer l'efficacité environnementale des véhicules 69
1) Améliorer le rendement énergétique des véhicules 69
2) Améliorer la qualité environnementale des carburants 70
a) Améliorer la qualité des carburants existants 70
b) Substituer par des carburants fossiles moins polluants 70
c) Substituer par des biocarburants 70
d) Substituer par une autre source d'énergie 73
3) Diffusion du progrès technologique, réglementations environnementales et instruments économiques 75
4) Conclusions 77
B - Promouvoir des Transports Rapides de Masse (TRM) 78
C - Ne pas oublier les déplacements non motorisés 84
D - Faciliter l'intermodalité 84
E - L'espace offert aux différents modes de transport 84

III - Les politiques visant à réduire la demande de mobilité 85
A - Droits de propriété et cadastres : un préalable aux politiques d'usage des sols ? 85
B - Les investissements en infrastructures primaires 86
C - Les règlements d'usage des sols 86
1) Réglementation : de l'offre foncière à la production foncière 86
2) Densité et mixité 87
3) Le contrôle des mutations 89
4) L'intervention publique directe 89
a) Le droit de préemption 89
b) Le remembrement foncier 89
c) L'expropriation 89
5) L'articulation entre le règlement d'utilisation des sols et le système de transport 89
D - La fiscalité foncière 91

IV - Conclusions 93

Conclusions de la première partie ……95

Chapitre 3 : Les enseignements de l'histoire longue sur les relations fonctionnelles au sein du couple « transport – usage des sols » et leurs conséquences sur l'évolution de la structure urbaine 101

I - 1538 – 1900 : Bogota sans transport urbain, une ville dense et concentrique 104
A - La trame viaire, héritage du modèle hispano-américaine adaptée au site urbain 104
B - La voirie inadaptée aux véhicules 104

C - La distribution concentrique des populations et des activités 105
D - Absence de transport intra-urbain, développement des transports inter-urbains 105
E - La dynamique de densification 106

II - 1900 – 1930 : L'ère du tramway et l'expansion linéaire. 107
A - L'apparition de la roue dans les déplacements 107
1) Les transports en commun 107
2) Les transports individuels 108
3) Premières interventions municipales 109
B - Une nouvelle dynamique d'urbanisation : l'expansion linéaire 109

III - 1930 – 1970 : progressive suprématie de la route, polycentralisation de Bogota.. 110
A - Les transports urbains : concurrence bus – tramway et consolidation de l'automobile 110
1) Transport en commun : l'origine d'un système de bus privé et la concurrence au tramway . 110
2) Transport individuel : la rapide émergence de l'automobile 112
B - Une nouvelle dynamique d'urbanisation : atomisation et polarisation 112
1) Urbanisation en discontinuité physique et polarisée 112
2) La localisation résidentielle des classes moyennes et riches et l'érosion progressive du centre 113
3) Localisation industrielle 114
4) Alliance stratégique entre les développeurs urbains et les entreprises d'autobus 114
C - Réponses des pouvoirs municipaux à l'explosion physique de la ville 115
1) Expansion «administrative» 115
2) Planification urbaine : l'adaptation de Bogota à la voiture 115

IV - 1970 – 2000 : dégradation de la mobilité et consolidation de la structure urbaine de Bogota 117
A - Dégradation progressive de la mobilité 117
1) La congestion et ses conséquences 117
2) La répartition modale des déplacements en faveur des bus 118
3) La détérioration du service de transport collectif 119
4) La motorisation des populations riches 120
5) Une distribution spatiale déséquilibrée de la propriété des véhicules 120
6) Les difficultés de stationnement 121
7) Une volonté politique de développer la trame viaire 121
B - Une nouvelle dynamique urbaine : la consolidation et la recomposition interne de la forme et de la structure urbaine héritée 123
1) Les facteurs explicatifs de la consolidation 123
2) La consolidation de la forme et de la structure urbaine héritée. 125
a) Localisation résidentielle des populations moyennes et riches : « tendance aux retours », micro-ségrégation et densification 125
b) Renforcement du polycentrisme 127
i) Dégradation sociale et physique du centre ville 127
ii) Augmentation du poids des pôles périphériques 127
3) Une dynamique de recomposition interne de l'espace urbain hérité 127
C - Les marchés foncier et immobiliers, reflets et causes des dynamiques de structuration urbaine 130
1) Distribution spatiale des prix fonciers à la fin du 20ème siècle 130
a) Distribution monocentrique des prix fonciers 130
b) Relation entre les prix fonciers et les usages des sols 131
c) Relation entre les prix fonciers et les densités brutes 131
d) Relation entre les prix fonciers et la desserte routière 132
e) Conclusions 132
2) Evolution sur la période 1970 - 2000 des loyers et des prix d'achat-vente de l'immobilier ancien et neuf 132
a) Tendance générale 132
b) Cycles 134
c) Articulations entre le marché locatif et le marché immobilier ancien 135
d) Articulations entre les marchés immobiliers ancien et neuf 136
3) Evolution sur la période 1970 - 2000 des prix fonciers 136
a) Tendance générale 136

b) Cycles ... 137
c) Distribution spatiale de cette croissance de long terme des prix fonciers ... 138
i) Selon le type d'usage des sols, sur l'ensemble de la période 1960 - 1998 ... 138
ii) Selon le type d'usage des sols, par phases ... 138
iii) Selon le type d'usage des sols, sur le dernier cycle 1991 -1998 ... 139
iv) Selon le degré de consolidation ... 140
v) Pour les périphéries ... 141
vi) Conclusions ... 141
4) Articulations entre le marché immobilier et le marché foncier : reflet des dynamiques urbaines sur la période 1970 - 2000 ... 142
5) Conclusions ... 145

V - Analyses des causes et réponses à la crise de la mobilité ... 145
A - Les causes de la crise de la mobilité à la fin des années 1990 ... 145
1) Taux de motorisation et mobilité à la fin des années 1990 ... 145
2) Une offre de voirie suffisante ... 146
3) La gestion du réseau routier ... 147
a) Le réseau de feux rouges : la « vague rouge » ... 147
b) Le design et l'état de la voierie ... 147
c) Les arrêts de bus ... 148
d) Le stationnement illégal sur la voie et les trottoirs ... 148
4) Le manque de capacité financière ... 148
5) Le manque de ressource humaine de l'administration ... 149
6) L'administration et la planification du système de Bus ... 149
a) Une organisation inefficace conduisant … ... 149
b) … à la guerre du centime … ... 151
c) … et à la sur-offre et à la dégradation du service de bus, cercle vicieux au détriment de l'usager ... 152
7) Conclusions ... 152
B - La longue marche jusqu'au projet TransMilenio ... 153
1) «Faire l'Histoire» : les multiples projets de Métro pour la capitale ... 153
2) La décision de construire un BRT ... 156
3) L'infrastructure TransMilenio ... 157
4) Un Partenariat Public-Privé revisité ... 158
5) Les résultats ... 160
C - Conclusions ... 161

VI - Conclusions ... 163

Chapitre 4 : Analyse des effets d'une infrastructure de Transport Rapide de Masse (le B.R.T. TransMilenio) sur la structure urbaine ... 167

I - Analyse des effets du TransMilenio sur les prix fonciers et immobiliers ... 168
A - Contexte général : évolution des prix fonciers et immobiliers pour l'ensemble de l'agglomération sur la « période TransMilenio » ... 169
B - Effets du TransMilenio sur les loyers le long des corridors BRT ... 171
C - Comparaison de l'évolution (1999 – 2004) des prix fonciers entre les zones affectées par le TransMilenio et le reste de l'agglomération ... 172
1) Sélection des zones d'étude ... 172
2) Comparaison des 11 zones affectées par le TransMilenio avec l'ensemble de l'agglomération ... 173
a) Avant la « période TransMilenio » ... 173
b) Sur la « période TransMilenio ». ... 173
3) Evolution comparée des prix fonciers nominaux sur les 11 zones d'étude durant la « période TransMilenio » ... 174
4) Variation des prix fonciers en termes réels des zones affectées par le TransMilenio ... 175
5) Comparaison avec l'évolution des prix fonciers dans des zones similaires mais non-affectées par le TransMilenio ... 176

D - Effets différenciés du TransMilenio sur les prix fonciers selon l'estrato, l'usage des sols et le degré de consolidation ... 178
1) Comparaison de l'évolution des prix fonciers des zones d'étude selon l'*estrato* de la zone . 178
2) Comparaison de l'évolution des prix foncier des zones d'étude selon l'usage des sols dominant dans la zone ... 181
3) Comparaison de l'évolution des prix fonciers des zones d'étude selon le degré de consolidation de la zone ... 184
E - Conclusions générales sur la valorisation foncière liée à la construction du BRT ... 187

II - Effets du TransMilenio sur l'intensité de l'usage des sols le long des corridors BRT ... 188

III - Effets du TransMilenio sur la distribution spatiale des activités et résidences le long des corridors BRT ... 192
A - La substitution « résidence pour tertiaire » le long des corridors BRT ... 192
B - Evolution de la typologie des activités tertiaires le long des corridors BRT ... 194
C - Conclusions ... 195

IV - Effets du TransMilenio sur les périphéries de l'agglomération ... 196
A - Distribution spatiale de la croissance démographique entre 1999 et 2004 ... 196
B - Décalage avec la planification urbaine ... 197
C - La conurbation entre Soacha et Bogota ... 200
D - Conclusions ... 201

V - Effets du TransMilenio sur le système de transport et la mobilité urbaine ... 202
A - Evolution de la répartition modale des déplacements ... 202
B - Evolution de la distance des déplacements ... 203
C - Evolution de la durée des déplacements ... 204
D - Evolution de la matrice Origine – Destination des déplacements ... 206

VI - Conclusions ... 216

Conclusions de la deuxième partie ... 219

Chapitre 5 : Evaluation des outils de simulation des interactions « transport – usage des sols ». Le choix de TRANUS et la construction de TRANUS-SETU ... 225

I - Les critères de choix de l'outil de simulation ... 226
A - L'exigence de cohérence ... 226
B - L'exigence de pertinence ... 227
C - L'exigence de mesurabilité ... 229

II - Les théories et méthodes développées pour représenter les interactions « transport – usage des sols » ... 230
A - Les théories sociales (géographie et sociologie) ... 230
1) Le développement urbain, résultat de l'appropriation individuelle et collective de l'espace 230
2) Les modèles produits ... 231
3) Les limites ... 232
B - Les théories micro économiques ... 232
1) Les hypothèses du modèle de base de la localisation résidentielle (Alonso 1964) ... 232
a) La représentation de l'espace urbain ... 233
b) Les caractéristiques des activités et des agents économiques ... 233
c) Les caractéristiques des déplacements ... 233
d) Les enchères sur le marché foncier ... 233
2) Formalisation mathématique du modèle d'Alonso ... 234
a) Les conditions de l'équilibre spatial des ménages ... 234
b) Le mécanisme d'enchère foncière ... 235
3) Les principaux enseignements du modèle d'Alonso ... 236

a) Effet d'une variation des coûts de transport ... 236
b) Effet d'une augmentation générale des revenus et d'une différenciation des revenus au sein d'une population ... 237
c) Effet d'une augmentation de la population ... 237
4) Critiques et élargissements du modèle d'Alonso ... 238
a) La représentation du système de transport ... 238
i) La trame viaire ... 239
ii) Le service de transport urbain ... 239
iii) La concurrence entre les modes de transport ... 239
iv) La congestion du trafic ... 240
b) La distribution spatiale des aménités urbaines et la capitalisation immobilière ... 240
i) Le modèle de choix résidentiel avec externalités ... 240
ii) La capitalisation immobilière ... 241
iii) Les préférences spatiales des ménages et la localisation résidentielle Richardson (1977) et Papageourgiou (1973) ... 241
5) Les limites ... 242
C - Le syncrétisme des ingénieurs et planificateurs ... 242
1) Les modèles de transport conventionnels à quatre temps (UTMS) ... 243
a) Les principes et caractéristiques des modèles conventionnels à quatre temps ... 243
a) Les limites des modèles conventionnels à quatre temps ... 246
i) La cohérence ... 246
ii) La pertinence ... 246
La non prise en compte des interactions « transport – usage des sols » ... 246
La remise en cause de la causalité uni-directionnelle ... 246
La remise en cause de la séquentialité ... 246
L'agrégation des données ... 246
L'inadaptation aux prévisions de long terme ... 246
iii) La mesurabilité ... 247
2) Les modèles de choix discrets (DCM) ... 247
a) Les principes des modèles de choix discrets ... 247
b) Les limites des modèles de choix discrets ... 249
i) La cohérence des DCM ... 249
ii) La pertinence des DCM ... 249
iii) La mesurabilité des DCM ... 250
3) Les modèles stratégiques (SM) ... 250
4) Les modèles interactifs « transport – usage des sols » (LUTM) ... 251
D - Conclusions ... 252

III - Les modèles interactifs « transport – usage des sols » ... 253
A - Pluralité des modèles interactifs ... 253
1) Des objectifs différents ... 254
2) Les spécificités de représentation ... 255
3) Les sous-systèmes urbains pris en compte ... 255
4) Les spécificités de structure des modèles ... 256
B - Les différentes techniques de modélisation utilisées par les modèles interactifs ... 256
1) La théorie de la base (Hoyt, 1954) et le modèle gravitaire de Lowry (1964) ... 259
a) La théorie de la base (Hoyt, 1954) ... 259
i) Les principes ... 259
ii) L'énoncé du modèle de la base économique ... 260
iii) Difficultés et limites ... 260
La détermination des activités basiques ... 260
Le caractère statique du modèle ... 260
b) Structure mathématique du modèle de Lowry (1964) ... 261
i) L'utilisation du sol ... 261
ii) Détermination de la population et localisation des ménages ... 261
iii) Détermination du niveau d'emploi du secteur de détail et localisation des activités ... 262
iv) L'emploi total ... 263
c) Les limites et les perfectionnements du modèle de Lowry ... 263
i) La faiblesse de la spécification des modèles d'interaction spatiale ... 263
ii) La faiblesse des fondements théoriques ... 263
iii) Le caractère statique du modèle ... 264

2) La maximisation de l'entropie (Wilson, 1967) et l'utilité aléatoire (Domenich et McFadden, 1975) ... 265
a) Macro-analyse des comportements : l'analogie thermodynamique et le concept d'entropie ... 265
i) Le concept d'entropie : une macro-analyse du comportement spatial ... 265
ii) Maximisation de l'entropie sous contraintes ... 267
iii) Intérêt et limite de l'analyse ... 267
b) Micro-analyse du comportement spatial individuel : la théorie de l'utilité aléatoire (McFadden, 1973) ... 267
i) Le modèle logit multinomial (MNL) ... 268
ii) Logit multinomial emboîté (NMNL) ... 268
iii) Logit multinomial emboîté à échelle (SNMNL) ... 269
c) La relation entre les modèles d'interaction spatiale et les modèles de choix discrets ... 270
3) La notion d'accessibilité ... 271
a) Définitions (Hansen, 1959) ... 271
b) Des mesures de l'accessibilité ... 271
c) Théories économiques et accessibilité ... 273
i) L'apport de la théorie micro-économique au concept d'accessibilité (Koenig, 1974) ... 273
ii) L'application de la théorie de l'utilité aléatoire (Ben-Akiva, Lerman, 1979) ... 275
iii) La théorie de l'accès (Martinez, 1995) ... 276
C - Les modèles interactifs d'optimisation ... 277
1) SALOC ... 278
2) TOPAZ (TOPMET) ... 278
3) Conclusions ... 278
D - Les modèles interactifs de prévision statiques ... 278
1) DSCMOD ... 279
2) IMREL ... 279
3) MUSSA (5-LUT) ... 279
4) Critiques ... 280
E - Les modèles interactifs de prévision quasi-dynamiques ... 281
1) Les modèles interactifs de prévision quasi-dynamiques basés sur l'entropie ... 281
a) DRAM/EMPAL (ITLUP, METROPILUS) ... 281
b) LILT ... 283
c) Critiques ... 283
2) Les modèles interactifs de prévision quasi-dynamiques spatiaux-économiques ... 283
a) METROSIM ... 284
b) TRANUS et MEPLAN ... 285
i) Les similitudes entre TRANUS et MEPLAN ... 285
ii) Critiques communes à TRANUS et MEPLAN ... 288
iii) Les différences entre TRANUS et MEPLAN ... 289
3) Les modèles interactifs de prévision quasi-dynamiques basés sur l'activité ... 291
a) IRPUD (DORTMUND) ... 291
b) URBANSIM ... 294
c) Critiques ... 296
F - Conclusions ... 296

IV - Présentation de TRANUS – SETU ... 297
A - Présentation de TRANUS ... 297
1) Description du modèle TRANUS ... 297
2) Les calculs dans le module d'occupation des sols ... 300
a) Localisation de la variation incrémentale des variables exogènes ... 300
b) Calcul des fonctions d'attraction pour les activités induites ... 301
c) Estimation de la demande induite ... 301
d) Estimation des coûts de production ... 303
e) Localisation de la production induite ... 303
f) Calcul des coûts de consommation ... 304
g) Calcul des désutilité de consommation ... 304
h) Vérification des capacités de production et ajustement des prix d'équilibre ... 304
i) Convergence ... 305
3) L'interface entre les modules d'occupation des sols et de transport ... 305
4) Les calculs dans le modèle de transport ... 306

a) La demande de transport ... 307
b) L'offre de transport ... 307
i) L'offre opérationnelle ... 307
ii) L'offre physique ... 307
iii) La structure des coûts ... 308
iv) La construction des chemins possibles ... 309
v) Le calcul des désutilités ... 311
vi) La génération des déplacements ... 312
vii) Le partage modal ... 313
viii) L'affectation des déplacements ... 313
ix) La « restriction liée à la capacité » ... 313
x) La convergence ... 313
B - Présentation de la Signature Energétique des Transports Urbains (SETU) ... 313

V - Conclusions ... 314

Chapitre 6 : Application de TRANUS-SETU à Bangalore, Inde ... 317

I - Présentation du cas d'étude : Bangalore, Inde ... 319
A - Le boom économique ... 319
B - Le boom démographique ... 320
C - Le boom spatial ... 322
D - Une distribution hétérogène des densités ... 325
E - La morphologie de Bangalore ... 328
1) L'organisation aréolaire ... 328
a) Le cœur de la ville ... 328
b) La première couronne en mutation ... 328
c) La deuxième couronne de densification et restauration ... 329
d) La troisième couronne du vide d'occupation ... 329
e) La quatrième couronne d'extension future ... 329
f) La cinquième couronne de la ceinture verte ... 329
2) L'organisation radio-concentrique ... 329
3) Le croisement des deux organisations ... 330
F - Le boom de la motorisation ... 331
G - Une structuration tendancielle alarmante ... 333
H - La menace d'engorgement ... 334

II - Application de TRANUS-SETU à Bangalore ... 334
A - Application de TRANUS à Bangalore ... 334
B - Application de la Signature Energétique des transports Urbains (SETU) à Bangalore ... 337

III - Construction des scenarii étudiés ... 340
A - Les débats ... 340
1) Efficacité environnementale des véhicules ... 340
2) Programme d'investissement dans les infrastructures de transports ... 341
3) Politiques d'usage des sols ... 341
4) Politiques des prix ... 342
5) Intégration des politiques urbaines ... 343
B - Les scénarii possibles ... 344
C - Les scenarii choisis ... 344
1) Scénario Business As Usual (« BAU ») ... 344
2) Scenario « ROUTE » ... 346
3) Scénario « METRO- » ... 348
4) Scénario « METRO+ » ... 349
5) Scénario « BRT- » ... 350
6) Scénario « BRT+ » ... 351
D - Les hypothèses ... 353

IV - Analyse des résultats de l'application de TRANUS-SETU à Bangalore ... 356
A - Evolution des consommations énergétiques selon différents scénarios de politiques urbaines 356

B - Evolution de la structure urbaine selon différents scénarios de politiques urbaines..... 358
V - Conclusions 371

Conclusions de la troisième partie ……373

Conclusions générales de la thèse …….375

Annexes ……..381

Bibliographie 399

Liste des cartes

Carte 1 : Emission moyenne de CO2 par déplacement en Ile de France selon le lieu de résidence..... 22
Carte 2 : Plan du système de bus BRT (Curitiba) 68
Carte 3 : Evolution de la forme urbaine de Bogota. 1538 – 2000. 103
Carte 4 : Plan de Santa Fé de Bogota et ses environs en 1797. 104
Carte 5 : Bogotá 1791 104
Carte 6 : Lignes du tramway. Expansion linéaire de Bogota vers Chapinero - 1913 109
Carte 7 : L'urbanisation de Bogota. 1900 - 1993 122
Carte 8 : Distribution spatiale des différentes classes socio-économiques. 1990. 126
Carte 9 : Distribution spatiale des commerces et services à la fin du 20ème siècle 129
Carte 10 : Les phases de construction du TransMilenio 156
Carte 11 : Plan des lignes du TransMilenio - 2006 160
Carte 12 : Evolution de la forme urbaine de Bogota. 1538 – 2000. 162
Carte 13 : Les corridors du BRT TransMilenio de la première et deuxième phase 168
Carte 14 : Distribution spatiale des classes socio-économiques et corridors TransMilenio 179
Carte 15 : Les corridors BRT de la première phase 189
Carte 16 : Pourcentage de commerce par rapport aux résidences 193
Carte 17 : Evolution du pourcentage de commerce par rapport aux résidences entre 2000 et 2003 ... 193
Carte 18 : Distribution spatiale de la croissance démographique entre 1999 et 2004 197
Carte 19 : Typologie des sols urbains dans le Plan d'urbanisme de Bogota. 2004 198
Carte 20 : Projet d'extension du corridor BRT jusqu'au cœur de Soacha 201
Carte 21 : Urbanisation périphérique autour de l'agglomération de Bogota 201
Carte 22 : Distribution de la distance moyenne des déplacements en 2005 204
Carte 23 : Durée moyenne des déplacements 1999 205
Carte 24 : Durée moyenne des déplacements 2002 205
Carte 25 : Diminution des temps de déplacements entre 1999 et 2005 205
Carte 26 : Distribution spatiale des temps de déplacements en 2005 206
Carte 27 : Distribution spatiale des Origines et Destinations des déplacements. 1995 207
Carte 28 : Génération et attraction de déplacement par UPZ 208
Carte 29 : Les localités de Bogota 208
Carte 30 : Evolution du nombre de déplacements « retours au logement » entre 1995 et 2005 209
Carte 31 : Evolution du nombre de déplacements « aller travailler ou étudier » entre 1995 et 2005.. 211
Carte 32 : Evolution du nombre de déplacements « aller travailler ou étudier » entre 1995 et 2005.. 212
Carte 33 : Etalement urbain de Bangalore 1970 – 2003 : 323
Carte 34 : « Tâche urbaine » de Bangalore, en comparaison de celle d'Atlanta et Barcelone 324
Carte 35 : Distribution spatiale des densités à Bangalore en 2001 326
Carte 36 : Représentation 3-Dimensions de la répartition spatiale des densités à Bangalore 327
Carte 37 : Représentation schématique de la structure urbaine de Bangalore : 330
Carte 38 : Division zonale de Bangalore 335
Carte 39 : Division de Bangalore en 48 zones 337
Carte 40 : Représentation graphique de Bangalore dans TRANUS 337
Carte 41 : Représentation dans TRANUS des trois périphériques routiers 346
Carte 42 :Tracé des deux lignes de métro en projet à Bangalore 348
Carte 43 :Représentation dans TRANUS des deux lignes de métro à Bangalore 349
Carte 44 : Représentation dans TRANUS des neuf lignes de BRT (en rouge). 351
Carte 45 : Représentation dans TRANUS des onze lignes de BRT (en rouge) 353

Liste des photographies

Photo 1 : Bus bi-articulé (Curitiba) 68
Photo 2 : Corridor BRT (Curitiba) 68
Photo 3 : Développement urbain le long des corridors BRT (Curitiba) 68
Photo 4 : Métro lourd (Santiago et Manille) 78
Photo 5 : Métro léger (Le Caire et Sapporo) 78
Photo 6 : Train de banlieue (Buenos Aires et Mumbay) 79
Photo 7 : Bus Rapid Transit (Bogota et Quito) 79
Photo 8 : Tramway à traction animale sur la route du centre vers Chapinero - 1895 106
Photo 9 : Tramway électrique sur la Calle 26 - 1910 108
Photo 10 : Autobus de Bogota - 1926 108
Photo 11 : Tramway en feu lors des émeutes du 9 Avril 1948 111
Photo 12 : Vue aérienne du quartier central de San Diego - 1960 116
Photo 13 : Vue aérienne du centre de Bogota - 1960 116
Photo 14 : Centre ville historique de Bogota 144
Photo 15 : Centre ville moderne de Bogota 144
Photo 16 : Infrastructures TransMilenio 157
Photo 17 : Station TransMilenio (vue intérieure) 158
Photo 18 : Station TransMilenio (vue extérieure) 158
Photo 19 : Bus articulé 158
Photo 20 : Bus d'alimentation 158
Photo 21 : Piétonisation du Eje Ambiental 183
Photo 22 : Réhabilitation du bidonville El Cartucho (1998 – 2000) 183
Photo 23 : La cité Colsubsidio 186
Photo 24 : Portal du corridor BRT de la Calle 80 187
Photo 25 : Ciudad Bolivar 198

Liste des tableaux

Tableau 1 : Répartition sectorielle de la consommation énergétique de quelques villes 4
Tableau 2 : Consommations d'énergie dans les transports urbains de 84 grandes villes 14
Tableau 3 : Typologie des villes fondée sur la densité métropolitaine moyenne et les transports 19
Tableau 4 : Évolution de la densité urbaine et de l'usage des transports 44
Tableau 5 : Investissements en équipement dans les villes nouvelles d'Ile-de-France 59
Tableau 6 : Emissions de CO_2 selon le lieu de résidence en Ile-de-France 61
Tableau 7 : Mobilité de franciliens selon leur lieu de résidence et émissions de CO_2 62
Tableau 8 : Temps de déplacements aller et revenir du travail 62
Tableau 9 : Modes de transport des actifs selon leur lieu de résidence 62
Tableau 10 : Temps de déplacement des actifs selon leur lieu de résidences et mode de transport 63
Tableau 11 : Coûts avant taxes du biodiesel et du diesel, 2003 71
Tableau 12 : Coûts avant taxes de l'éthanol et de l'essence, 2003 71
Tableau 13 : Bilans GES des filières biocarburants, comparativement aux carburants pétroliers. 72
Tableau 14 : Puissances électriques nécessaires et économies potentielles des véhicules hybrides 73
Tableau 15 : Émissions de CO_2 du puits à la roue selon les systèmes de propulsion (gCO2/km) 74
Tableau 16 : Diffusion des réglementations euro 1 à 4 pour des nouveaux véhicules en Asie 76
Tableau 17 : Caractéristiques des différents systèmes de Transport Rapide de Masse. 80
Tableau 18 : Investissements initiaux pour différents système de Transport Rapide de Masse 81
Tableau 19 : Coûts de différentes technologies bus comparés à un wagon métro standard 82
Tableau 20 : Capacité observée de différents Transports Rapides de Masse 83
Tableau 21 : Consommation d'énergie par pass-km pour différents modes et conditions d'opération 83
Tableau 22 : Taux de croissance démographique à Bogota 1870 – 2000 102
Tableau 23 : La progressive suprématie du bus sur le tramway 111
Tableau 24 : Evolution du parc automobile 1912 – 1950 112
Tableau 25 : Flux de passagers sur les principaux corridors de Bogota en 1999 118
Tableau 26 : Distribution modale des déplacements en 1999 119
Tableau 27 : Tendances de long terme des prix immobiliers réels. 1970 - 2003 133
Tableau 28 : Prix moyen (Pesos / m2) et taux de croissance annuel moyen 1960 – 1998 138
Tableau 29 : Prix fonciers (Pesos / m2) par secteur urbain et par phase sur la période 1960 - 1998 .. 139
Tableau 30 : Taux de croissance des prix fonciers par secteur et par phase, 1960 - 1998 139
Tableau 31 : Taux de croissance des prix fonciers par secteur et par phase, 1991 - 1998 140
Tableau 32 : Taux de croissance des prix fonciers des secteurs résidentiels selon le degré de consolidation. 1980 - 1988 140
Tableau 33 : Taux de croissance par zone selon le degré de consolidation. 1991 - 1995 141
Tableau 34 : Mobilité et motorisation pour diverses villes mondiales 1992 146
Tableau 35 : Voierie urbaine à Bogota et dans zones urbaines des USA (1992) 147
Tableau 36 : Taux de croissance des loyers et des prix fonciers et immobiliers. 2000 - 2004 169
Tableau 37 : Evolution des prix fonciers de l'agglomération, des zones en valorisation et des zones affectées par le TransMilenio durant la « période TransMilenio » 173
Tableau 38 : Taux de croissance annuelle des prix fonciers des zones 69, 71, 67 et 73. 176
Tableau 39 : Population et zones desservies par le système TransMilenio. 1999 179
Tableau 40 : Comparaison selon l'*estrato* de l'évolution des prix fonciers des 11 zones d'études affectées par le TransMilenio durant la période « TransMilenio » 180
Tableau 41 : Comparaison de l'évolution des prix fonciers des 11 zones d'études affectées par le TransMilenio durant la période « TransMilenio » selon l'usage des sols dominant 182
Tableau 42 : Comparaison de l'évolution des prix fonciers des 11 zones d'études affectées par le TransMilenio durant la période « TransMilenio » selon le degré de consolidation 184
Tableau 43 : Evolution du pourcentage d'appartements vacants le long des corridors BRT 189
Tableau 44 : Evolution du nombre de résidences à la location et à la vente le long du BRT 190
Tableau 45 : Evolution de l'espace vacant dans les zones le long des corridors BRT. 190
Tableau 46 : Evolution du taux d'occupation des appartements le long des corridors BRT 191
Tableau 47 : Substitution « résidences pour commerces » le long des corridors BRT 192

Tableau 48 : Evolution des proportions des principales activités tertiaires le long du BRT 195
Tableau 49 : Projection de croissance de la population par localité. 199
Tableau 50 : Comparaison de la densité de Bogota avec d'autres mégapoles. 200
Tableau 51 : Evolution de la distribution modale des déplacements entre 1995 et 2004 203
Tableau 52 : Nombre de passagers par mode de transport 203
Tableau 53 : Les sous-systèmes urbains pris en compte dans les différents modèles interactifs 255
Tableau 54 : Contingences représentant une distribution du système spatial à un moment donné 265
Tableau 55 : Présentation des scénarii possibles 344
Tableau 56 : Consommation des quintiles de population par les activités basiques et induites 353
Tableau 57 : Taux de génération de population par les différentes activités 354
Tableau 58 : Salaire annuel des différents quintiles de population 354
Tableau 59 : Répartition des emplois entre les activités 354
Tableau 60 : Croissance démographique identique pour les différents scénarios 355
Tableau 61 : Evolution de la population étudiante et des emplois par catégories 355
Tableau 62 : Résultats de l'application de TRANUS-SETU à Bangalore 356
Tableau 63 : Taux de croissance annuels des SETU des différents scénarios de politiques urbaines 358
Tableau 64 : Evolutions des prix fonciers selon différents scénarii de politiques urbaines 359

Liste des graphes

Graphe 1 : Consommations énergétiques dans les transports - densité 18
Graphe 2 : Comparaison de la densité moyenne de 49 mégapoles 21
Graphe 3 : Distribution des densités résidentielles dans quelques villes 26
Graphe 4 : Profiles de densités de Johannesburg, Brasilia, Moscou 28
Graphe 5 : Comparaison de profiles de densités 29
Graphe 6 : Typologie des déplacements urbains selon Bertaud 32
Graphe 7 : Comparaison de profile de densité 33
Graphe 8 : 20 structures spatiales urbaines stylisées 35
Graphe 9 : Comparaison de disponibilité moyenne d'espace par habitant 37
Graphe 10 : Relation entre la structure spatiale et l'efficacité des moyens de transport urbains 38
Graphe 11 : Quel avenir pour les villes du Sud : Atlanta ou Barcelone ? 46
Graphe 12 : Profile de densité de Barcelone et Atlanta. 1990 49
Graphe 13 : Taux d'endettement et annuités des Syndicats d'Agglomération Nouvelle Ile-de-France 59
Graphe 14 : Taux d'emploi des villes nouvelles 60
Graphe 15 : La « tenaille » des politiques de réductions des émissions des transports urbains 65
Graphe 16 : Schéma des axes structurants BRT (Curitiba) 68
Graphe 17 : Émissions de GES pour différents systèmes de moteur à pile à hydrogène 75
Graphe 18 : Comparaison « investissement initial / capacité » pour différents TRM 81
Graphe 19 : Comparaison des coûts liés au cycle de vie de différents systèmes de TRM 82
Graphe 20 : Loyer réel et tendance (moyenne) 133
Graphe 21 : Prix moyen de l'immobilier ancien 133
Graphe 22 : Loyers réels selon le niveau socioéconomique des quartiers 134
Graphe 23 : Prix moyens de l'immobilier ancien selon le niveau socioéconomique des quartiers 134
Graphe 24 : Evolution des loyers par rapport à 1991 selon le niveau socioéconomique des quartiers 135
Graphe 25 : Evolution des prix moyens de l'immobilier ancien par rapport à 1991 selon le niveau socioéconomique des quartiers 135
Graphe 26 : Comparaison de l'évolution entre les prix immobiliers moyens et les loyers moyens 135
Graphe 27 : Evolution du rapport entre le loyer et le prix immobilier (en moyenne) 135
Graphe 28 : Evolution du rapport entre le loyer et le prix immobilier (en %) selon le niveau socioéconomique du quartier 136
Graphe 29 : Prix foncier moyen. 1970 - 2002 137
Graphe 30 : Taux de croissance moyen annuel des prix fonciers entre 1960 et 1998 137
Graphe 31 : Croissance du prix foncier 143
Graphe 32 : Relations entre le gouvernement de la ville, les compagnies de bus et les propriétaires de bus et les usagers à Bogota en 1997 151
Graphe 33 : Insertion centrale des corridors BRT à la voirie 158
Graphe 34 : Evolutions relatives à 1991 des loyers, prix immobiliers et fonciers moyens 170
Graphe 35 : Evolutions relatives à 1991 des loyers, prix immobiliers et fonciers des quartiers classes moyennes 170
Graphe 36 : Evolutions relatives à 1991 des loyers, prix immobiliers et fonciers des quartiers aisés 170
Graphe 37 : Evolutions relatives à 1991 des loyers, prix immobiliers et fonciers, quartiers pauvres. 170
Graphe 38 : Evolutions des prix fonciers courants des 11 zones d'étude affectées par TransMilenio 174
Graphe 39 : Taux de croissance annuelle des prix réels des 11 zones d'étude affectées par le TransMilenio 176
Graphe 40 : Evolutions comparées des prix fonciers : zones affectées – zones non-affectées par le TransMilenio 177
Graphe 41 : Représentation de l'évolution de la matrice Origines – Destinations, 1996 - 2006 215
Graphe 42 : Boucle de rétroaction Transport – Usage des Sols. 228
Graphe 43 : Représentations des trois principaux modèles de la géographie urbaine 231
Graphe 44 : Effets d'une amélioration des moyens de transport sur la fonction de prix du sol 236
Graphe 45 : Effets d'une augmentation de la population 238
Graphe 46 : Structure standard des modèles conventionnels de déplacements urbains 244

Graphe 47 : Relations entre le système des transports et les systèmes d'occupation des sols. 252
Graphe 48 : Théories d'économie spatiale mobilisées dans le développement des modèles interactifs de transport et de localisations. 258
Graphe 49 : Le modèle de Lowry 261
Graphe 50 : Typologies des modèles interactifs « transport – usage des sols » 277
Graphe 51 : Architecture du modèle DRAM / EMPAL 282
Graphe 52 : Principaux éléments de TRANUS 286
Graphe 53 : Séquence de calcul dans TRANUS 286
Graphe 54 : Articulation transport – usage des sols dans les modèles de type « vecteurs vers matrices vers vecteurs » 287
Graphe 55 : Articulation transport – usage des sols dans les modèles de type « vecteurs vers matrices vers vecteurs » 288
Graphe 56 : Demande élastique et facteurs de pénalité 290
Graphe 57 : Architecture du modèle IRPUD 293
Graphe 58 : Structure générale du modèle TRANUS 299
Graphe 59 : Structure du module d'occupation des sols 300
Graphe 60 : Interface entre le module d'occupation des sols et le module de transport 306
Graphe 61 : Les éléments du système de transport. 307
Graphe 62 : Graphique dual créé par TRANUS 308
Graphe 63 : Séquence de calcul du module de transport 309
Graphe 64 : Désutilités et probabilités calculées pour les différents niveaux de décision. 312
Graphe 65 : Croissance démographique de Bangalore 1901 – 2021 321
Graphe 66 : Croissance démographique des villes millionnaires indiennes 1901 – 2001 321
Graphe 67 : Nombre de véhicules dans les villes millionnaires indiennes en 2004 331
Graphe 68 : Nombre de véhicules pour 100 habitants dans les villes millionnaires indiennes, 2004. 331
Graphe 69 : Répartition modale des déplacements à Bangalore en fonction du quintile. 2002 332
Graphe 70 : Evolution des parcs de véhicules à Bangalore 333
Graphe 71 : Part modale des déplacements à Bangalore 333
Graphe 72 : Consommation énergétique Bus et voiture dans TRANUS 338
Graphe 73 : SETU des différents scénarii de politiques urbaine, Bangalore 357

Introduction générale de la thèse

1) L'explosion urbaine au Sud[1] : les défis

La transition urbaine du tiers-monde est massive, très rapide et concentrée dans de très grandes villes. En 2007, l'ONU estime que la moitié de la population mondiale vit en ville. En 2030, la population urbaine mondiale atteindra 4,9 milliards, soit 60% de la population mondiale. À peu près toute la croissance démographique mondiale se situera dans les villes du Sud, dont la population doublera, passant de deux à quatre milliards (soit la population totale du monde en développement en 1990) (UN, 2000). Accueillir deux milliards d'habitants en ville en trente ans, c'est construire et équiper chaque année l'équivalent de sept nouvelles villes de dix millions d'habitants, soit sept « Shanghai » ou « Jakarta », ou dix « Londres » par an. Bref, une croissance urbaine massive.

Si le monde en développement a été à prédominance rurale, il devient rapidement urbain : en 1950 18% seulement de la population des pays en développement vivaient en ville, en 2000 cette proportion est de 40% et elle sera de 56% en 2030. Bien que le monde développé soit plus urbain (76% d'urbain en 2000), le monde en développement connaît une croissance de la population urbaine bien plus rapide : le taux de croissance annuel moyen est de 2,57% alors qu'il n'excède pas 0,5% dans le monde développé (UN, 2004). Londres a mis cent trente ans pour grossir de 1 à 8 millions d'habitants. Il n'aura fallu que quarante cinq ans à Bangkok, trente sept à Dhaka et vingt cinq à Séoul pour faire le même bond démographique. (UN-Habitat, 2005 ; PNUH, 2004)

Le troisième point marquant de cette évolution démographique est la concentration de cette population urbaine dans les Très Grandes Agglomérations (TGA) et méga-villes (agglomération de plus de, respectivement 2 et 10 millions d'habitants). En 1975, parmi les 5 villes à travers le monde dépassant 10 millions d'habitants, trois étaient situées dans les pays en développement ; de 19 aujourd'hui, ce nombre atteindra 23 villes en 2015, et toutes sauf 4 seront situées dans les pays en développement (UN, 2000).

Cette transition urbaine massive et rapide, et la décentralisation politique en cours dans les pays du Sud font des dynamiques urbaines un enjeu crucial du développement durable. La « ville pauvre à croissance démographique rapide[2] » est ainsi à la fois un sujet et un objet du développement durable.

Du point de vue du développement économique et humain ainsi que de la réduction de la grande pauvreté, cette explosion urbaine est certainement une excellente chose. Exode rural et croissance de la population en ville sont les plus sûrs moyens d'augmenter la productivité par tête dans l'agriculture et d'éradiquer l'immémoriale et terrible pauvreté rurale. Quand aux pauvres urbains, grâce à l'extraordinaire vitalité de l'économie « informelle » urbaine, ils ont beaucoup plus d'opportunités de sortir de leurs « trappes à pauvreté » que s'ils étaient restés dans le monde rural.

Cependant, il est incontestable qu'une urbanisation à ce point massive et rapide pose de redoutables problèmes dans au moins deux domaines. D'abord, il faut trouver les moyens de financer les énormes investissements de « peuplement urbain », pour reprendre le concept de Jean Marie Cour et Michel Arnaud (Cour, 2005), que cette croissance suppose. Faute de quoi, les avantages potentiels de la ville seront inaccessibles aux plus pauvres. Ensuite, compte tenu de la durée de vie des structures urbaines, c'est le type de croissance urbaine que connaîtront les villes du sud dans les trois prochaines décennies d'urbanisation exceptionnellement rapide qui va déterminer ce que seront leurs consommations énergétiques et leurs émissions de gaz à effet de serre dans la seconde moitié du siècle. Que les villes du Sud prennent pour modèle et convergent vers Atlanta ou Barcelone

[1] Nous utiliserons indifféremment dans la thèse les termes de « tiers-monde », « Sud », « pays en développement ».

[2] Nous définissons dans le paragraphe 4 de cette introduction générale le terme de « ville pauvre à croissance démographique rapide ».

(Barcelone loge et occupe une population 20% supérieure à celle d'Atlanta sur une surface 26 fois plus faible et consomme 11 fois moins d'énergie par habitant pour le transport urbain) et le changement climatique n'aura évidemment pas du tout la même ampleur à la fin du siècle.

Dans cette thèse, nous analysons le second de ces défis[3] : la soutenabilité, du point de vue des dangers du changement climatique, de la croissance urbaine au sud. Nous limitons notre analyse aux consommations énergétiques des transports urbains. C'est en effet dans ce domaine que le défi est le plus difficile à relever, et que les politiques suivies dans les années à venir auront un impact crucial sur les consommations énergétiques à long terme.

2) Incomplétude dans la réflexion sur la durabilité du développement urbain au Sud

Notre motivation initiale part d'un constat d'incomplétude dans la réflexion sur la durabilité du développement urbain dans les pays en voie de développement, menée aussi bien par les chercheurs que par les acteurs territoriaux.

Une hypothèse le plus souvent implicite est que le développement durable des villes pauvres, et en particulier des mégapoles, n'est qu'affaire de bonne gouvernance, de financement et de temps. D'où l'importance récente prise par les recherches sur la gouvernance urbaine et le financement des infrastructures urbaines, en particulier en mobilisant des partenariats public-privé. On se pose cependant peu la question de savoir si l'offre technologique (technique et organisationnelle) en matière d'habitat, de transport, de services de base (réseaux d'eau, d'assainissement, d'électricité), offre qui pour l'essentiel reproduit les solutions des villes riches, est susceptible de permettre un développement durable des villes pauvres.

Notre recherche consiste donc à examiner si, même dans l'hypothèse d'une gouvernance optimale, la simple reproduction des meilleures pratiques des villes du Nord est économiquement à la portée des villes pauvres et si cette reproduction des meilleures pratiques engendrerait un développement durable des villes du Sud. Il s'agit donc d'analyser s'il peut exister, avec les technologies actuelles, des trajectoires de croissance urbaine des villes pauvres qui, tout en donnant accès aux services essentiels, en particulier aux plus pauvres, le fasse à un coût compatible avec le rythme de croissance économique et à un coût écologique compatible avec un développement durable.

La question du caractère écologiquement soutenable de la croissance sera ici analysée à travers les consommations énergétiques engendrées par les fonctions urbaines.

Traiter ces questions passe par une modélisation des dynamiques de croissance des villes pauvres, permettant de construire des scenarii d'évolution de leurs consommations énergétiques.

Ainsi notre question initiale était la suivante : **L'exigence de soutenabilité environnementale au Sud remet-elle en cause l'offre de technologies urbaines ?** C'est-à-dire : Compte tenu des dynamiques de croissance démographique et des faibles capacités financières, les technologies accessibles aux villes du Sud sont-elles aptes à infléchir significativement les trajectoires des consommations énergétiques et les émissions de CO_2 liées ?

3) Les consommations énergétiques urbaines : la hiérarchie des enjeux

Les études des consommations énergétiques urbaines considèrent trois flux d'énergie traversant le système urbain :

- l'énergie de fonctionnement, énergie nécessaire au fonctionnement du système urbain, c'est à dire l'énergie utilisée pour les activités domestiques, tertiaires, industrielles et par les déplacements motorisés.
- l'énergie investie dans le bâti, qui correspond au contenu énergétique des matériaux et aux consommations énergétiques lors du montage et du transport de ces matériaux, puis lors des phases de construction, d'entretien, d'amélioration, d'extension et de démolition du bâti. L'investissement

[3] On trouvera une analyse du premier défi, le financement des « services essentiels » rendant la ville efficace aussi pour les pauvres, dans : Giraud, Lefevre, Maria, Ruet (2006)

énergétique varie avec le type de bâtiment, les formes des opérations urbaines et les techniques de construction.
- l'énergie incorporée dans les biens consommés dans la ville, qui correspond à l'énergie consommée durant l'ensemble du processus de fabrication (industrielle, agricole,etc.) et pour son transport jusqu'au lieu de consommation finale.

La prise en compte de l'énergie de fonctionnement ne fait pas débat. Il faut la comptabiliser pour analyser la durabilité du développement urbain car elle reflète la vie du système urbain dans l'ensemble de ses activités.

La prise en compte de l'énergie investie dans le bâti n'est pas pertinente pour certains auteurs tels Chaline (2003), qui cite pour les pays industrialisés un rapport de 1 à 20 entre la quantité d'énergie investie au départ et celle qui sera consommée par le bâtiment pendant son existence. Pourtant, un déficit d'investissement initial (qualité thermique des constructions, qualité des routes,…) devra être compensé par une dépense énergétique supérieure dans le fonctionnement de la ville.

L'énergie incorporée dans les biens de consommation est plus le reflet du mode de développement économique général que du mode de développement urbain. Sa prise en compte n'est pas utile aux comparaisons inter-villes.

Ainsi, si l'objectif est d'évaluer la durabilité du développement urbain au travers des consommations énergétiques, on peut se contenter d'une analyse de l'énergie de fonctionnement.

Les sources urbaines de consommations énergétiques peuvent être classées selon un «principe de responsabilité» :

1) des collectivités municipales : l'éclairage public, les bâtiments administratifs, éducatifs, récréatifs et culturels, les différents services,

2) des ménages : transports de personnes et de marchandises, chauffage, climatisation, cuisson, éclairage, etc.

3) des activités économiques : transports de personnes et de marchandises, usages électrique et vapeur, etc.

On peut également les classer par types de consommations finales : bâtiments résidentiels, bâtiments de services et activités tertiaires, déplacements urbains, processus industriels, services urbains en réseaux (éclairage, eau, assainissement, déchets).

Si les typologies de consommations proposées sont bien adaptées aux diverses questions que pose l'analyse des consommations énergétiques urbaines, en revanche, on dispose encore de très peu de données chiffrées systématiques et comparables. C'est que l'objet « ville » est apparu relativement récemment dans l'analyse économique, et encore plus dans l'analyse énergétique. Aucune comptabilité énergétique nationale ne fait pour l'instant de distinction entre consommations « urbaines » et « non urbaines ». Il est donc impossible d'évaluer avec précision le poids des villes dans la consommation nationale. On doit se contenter d'ordres de grandeurs ou de données partielles. C'est ainsi que selon certaines études, les consommations des transports urbains de personnes, dont nous allons parler ci-dessous, représenteraient, dans un pays comme la France, environ la moitié des consommations de transport de personnes, et seraient donc à égalité avec les transports interurbains.

Voici cependant quelques chiffres, obtenus de sources diverses, sur le volume global et la répartition par usage des consommations énergétiques pour quelques villes. Nous n'avons pas pris en compte l'industrie dans la répartition sectorielle. Les consommations industrielles ne sont en effet pas une question spécifiquement urbaine, même si la problématique de l'agglomération (la concentration géographique des activités) est évidemment importante dans l'efficacité énergétique de l'industrie - elle autorise en effet une « écologie industrielle » minimisant les consommations énergétiques et les émissions de déchets (co-génération, recyclage, etc.).

Tableau 1 : Répartition sectorielle de la consommation énergétique de quelques villes

Ville	année	Conso. Energ. sans industrie Tep/hab/an (avec production d'électricité)	Transport	Résidentiel	Tertiaire	Emissions CO_2 sans industrie T. CO_2/hab/an (avec production d'électricité)
Grenoble	1999	2,08	30 %	39 %	30 %	3,95
Londres	2000	1,79	22 %	47 %	31 %	5,54
Tokyo	1998	1,44	43 %	22 %	35 %	4,8
Shanghai	1998	0,36	52 %	29 %	19 %	1,9
Séoul	1998	1,18	34 %	42 %	24 %	3,17
Beijing	1998	0,54	20 %	40 %	40 %	1,64
Mexico Ciudad*	2004		*60,5%	*25,6%	*13,3%	

Source : Chiffres calculés par l'auteur à partir de : IGES, 2004 ; Best Foot Forward, 2002; EXPLICIT, 2002 ; IEA.
Note : * : Les pourcentages pour Ciudad Mexico indiquent la répartition des émissions de CO2 entre les secteurs urbains (sans l'industrie). Nous ne possédons pas les données des consommations énergétiques. (Source : Vazquez Martinez, O., 2004, Reduccion de Contaminentes Locales y Emissiones de Gases de Efecto Inverno Provenientes del transporte. Cité dans Fernandez Bremauntz, A., 2004)

Deux fonctions urbaines représentent la majorité des consommations énergétiques : les bâtiments (tertiaires et résidentiels) et le transport. De l'analyse des déterminants et des parts relatives - actuelles et projetées - des consommations énergétiques de différentes fonctions urbaines (transport, résidentielle et tertiaire) dans les pays développés et les pays en développement, on peut conclure que :

1) Dans le secteur du résidentiel et du tertiaire, beaucoup reste à faire mais les solutions technologiques sont connues. Les paradigmes technologiques ne sont pas remis en cause dans le secteur des bâtiments pour des raisons environnementales.

Les facteurs déterminant la répartition par usage et par type d'énergie ainsi que le volume global de la consommation énergétique urbaine dans les bâtiments sont bien identifiés. Ces facteurs ne sont pas indépendants et leurs relations doivent être prises en compte:

- le climat : les facteurs tenant à l'environnement naturel sont : la température, les conditions de vent, l'humidité relative de l'atmosphère et l'intensité de rayonnement solaire.
- les types de construction : la qualité et la nature des constructions déterminent les besoins en énergie de chauffage. Le coefficient de déperdition (de chaleur) «G» traduit la nature des matériaux, leur conductivité thermique, le volume, l'importance des superficies des parois extérieures et la situation par rapport aux logements voisins.
- la densité : la plupart des auteurs s'accordent sur le fait que, jusqu'à un certain point, à des densités résidentielles croissantes correspondent des consommations énergétiques proportionnellement de plus en plus faibles (en particulier pour le chauffage).
- le comportement des citadins : la différence entre la consommation réelle et la consommation théorique autorisée par les bâtiments et matériels relève du comportement des habitants. La variation des modes de vie des ménages reflétant la différence des appartenances socio-professionnelles, entraîne des variations sur : le niveau de confort recherché, le parc des appareils électroménagers, le choix des modes utilisés pour satisfaire tel ou tel usage énergétique. Le comportement dépend également de la nature des droits de propriété et d'usage sur les bâtiments dont bénéficient ceux qui les occupent.
- le prix relatif des énergies
- le fonctionnement du marché immobilier

Des solutions techniques existent pour réduire ces consommations énergétiques. L'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments constitue une source importante d'économie d'énergie dans les pays en développement, étant donné la part que représente le bâtiment dans la demande d'énergie commerciale. Il est bien sûr difficile de dégager des résultats valables pour l'ensemble des bâtiments,

étant donné l'importance des facteurs climatiques, technologiques, les conditions d'occupation, etc. sur la performance énergétique d'un bâtiment. Globalement, sur le plan technique, la littérature mentionne souvent des réductions rentables de consommation de l'ordre de 20 à 30%. Le temps de retour sur investissement des mesures peut varier de l'ordre de quelques mois à quelques années.

Le problème est : comment favoriser la pénétration de ces techniques dans le marché du bâtiment ? Le résoudre nécessite généralement une meilleure compréhension des processus socio-économiques qui organisent ces marchés et de corriger les imperfections de marché.

Nous pouvons citer pour exemple le programme de coopération[4] franco-chinois portant sur l'efficacité énergétique dans l'habitat en Chine. Le premier projet, mené de 1999 à 2004, s'est concentré sur l'amélioration de l'efficacité énergétique dans les logements sociaux neufs. 789.000 m2 de logements économes en énergie ont été réalisés dans trois villes du Nord de la Chine en zone froide : Pékin, Harbin et Shenyang. Cette opération de démonstration a permis de démontrer qu'il était possible de réduire de 50% les consommations d'énergie liées au chauffage, économisant ainsi 44.000 tonnes de CO_2 par an, pour un surcoût de construction acceptable pour les promoteurs chinois, compris entre 5% et 7% (Rieb, Bernard, Bernard-Hervé, 2006).

2) L'avenir des consommations de transports urbains est loin d'être aussi « rassurant ».

Le transport est déjà une source majeure de consommation énergétique dans tous les pays du monde, la principale dans le monde développé. La part du transport dans les consommations énergétiques des villes du Sud est vouée à augmenter considérablement avec le développement économique du Sud.

Les facteurs déterminant les consommations énergétiques des transports urbains sont d'une part beaucoup plus complexes à analyser, et d'autre part plus difficiles à influencer par des politiques publiques. Or il s'agit des consommations dont on prévoit que la croissance sera la plus rapide dans les scénarios tendanciels. De plus, les structures spatiales urbaines, dont on comprend bien l'influence qu'elles ont sur la demande de déplacement et donc sur les consommations énergétiques des transports, ont une durée de vie et une résilience bien supérieure à celle des bâtiments. Les actions dans ce domaine sont donc à la fois urgentes et engagent l'avenir pour le bien plus long terme.

Cette hiérarchie des sources de consommations énergétiques aujourd'hui et demain pousse à donner une priorité à l'action sur les transports. **Nous avons donc décidé de focaliser notre travail de thèse sur les consommations énergétiques et les émissions de gaz à effet de serre liées au secteur des transports urbains.**

4) Définition de l'objet d'étude et de la problématique de la thèse

Ainsi l'objet de recherche de cette thèse est : **« Les consommations énergétiques et émissions de CO_2 liées des transports urbains de passagers dans la ville pauvre à croissance démographique rapide ».**

En nous appuyant sur les définitions proposées par l'INSEE, nous utilisons indifféremment dans la thèse les termes de « ville », « aire urbaine » et « agglomération » pour désigner « l'unité urbaine » dont la délimitation est fondée sur le seul critère de continuité de l'habitat. Car elles sont une caractéristiques saillantes de la transition urbaine du tiers monde, nous nous intéressons dans ce travail de thèse essentiellement aux Très Grandes Agglomérations et méga-villes (agglomérations de plus de, respectivement, 2 et 10 millions d'habitants). Si certaines conclusions peuvent être transposées aux

[4] Ce programme de coopération associe du coté chinois les autorités locales, régionales et nationales, les experts, les promoteurs et les industriels, et du coté français le FFEM, le MEDD, l'ADEME, l'AFD, le CSTB.

villes de plus petites tailles, l'étude des villes de taille moyenne mérite, à notre avis, un travail spécifique.

Nous envisageons la « ville pauvre » comme inégalement et transitoirement pauvre. De fortes inégalités internes et une capacité financière initialement faible du fait d'un budget municipal restreint et d'une population en grande partie pauvre, voire très pauvre, la caractérisent.

En accord avec l'INSEE, nous définissons la « croissance démographique urbaine » par la variation de l'effectif d'une population d'une ville au cours de l'année, qu'il s'agisse d'une augmentation ou d'une diminution. La croissance démographique est la somme de l'accroissement naturel et du solde migratoire. Nous nous intéressons dans cette thèse aux villex connaissant des croissances démographiques rapides, c'est-à-dire les villes où le taux de croissance démographique annuel est proche ou supérieur au taux moyen de croissance de la population dans les villes du Sud, soit 2,5%.

Le transport urbain désigne le mouvement de voyageurs et de marchandises au sein de l'aire urbaine à pied ou à bord d'un mode de transport quel qu'il soit : ferroviaire, routier, fluvial, aérien, etc. Dans cette thèse, nous limitons notre recherche au transport urbain de passagers.

Par « technologie » nous entendons les techniques et les savoirs organisant ces techniques. L'interrogation porte donc d'une part sur la capacité des techniques de transport, existantes et accessibles financièrement aux villes pauvres, à réduire les consommations énergétiques, et d'autre part sur les connaissances et outils d'aide à la décision permettant l'élaboration de stratégies politiques sur le long terme capables de répondre au défi de la complexité des systèmes énergétiques urbains.

La problématique de cette thèse s'énonce donc plus précisément comme suit : **« Compte tenu des dynamiques de croissance démographique et des faibles capacités financières, les technologies accessibles aux villes du Sud sont-elles aptes à infléchir les trajectoires des consommations énergétiques et les émissions de CO_2 liées aux transports urbains de passagers ? »**

Cette problématique peut être décomposée en trois sous-questions :

- « Existent-elles ? » : les technologies existantes sont-elles capables d'infléchir les trajectoires des consommations énergétiques et les émissions de CO_2 liées aux transports urbains ?
- « Sont-elles accessibles aux villes du Sud ? » : compte tenu de leur faible capacité financière et de leur dynamique de croissance démographique rapide, les villes du Sud peuvent-elles financer ces technologies ?
- « Comment faire ? » : existe-t-il des outils d'aide à la décision adaptés à la définition, à la mise en place et au suivi-évaluation d'une stratégie de réduction des émissions de CO_2 dans les transports urbains ?

5) Plan général de la thèse

Le **chapitre 1** récapitule ce que nous savons aujourd'hui des déterminants des consommations énergétiques liées aux transports urbains et des évolutions récentes de ces déterminants. Le **chapitre 2** discute les solutions envisageables dans les politiques de transport et d'usage des sols pour placer les villes du Sud sur des trajectoires soutenables de développement. Ces deux chapitres s'appuient sur une revue critique de la littérature et constituent la **première partie** de la thèse.

Les conclusions de la première partie nous conduisent dans la **deuxième partie** de la thèse à examiner les interactions entre le système de transport et le système d'usage des sols sur une ville particulière, Bogota (Colombie). Le **chapitre 3** analyse le fonctionnement du couple « transport – usage des sols » au cœur des dynamiques urbaines sur le temps long. Le **chapitre 4** étudie les effets

d'une infrastructure de transport, le Bus Rapid Transit (BRT) TransMilenio, sur les marchés foncier et immobiliers, la structure urbaine et la matrice Origine-Destination des déplacements.

La **troisième partie** de la thèse s'intéresse aux outils de prospective capables de construire des trajectoires de consommation énergétique et d'émission de CO_2 et répond à la question de la thèse. Le **chapitre 5** évalue les outils informatiques de prospective capables de simuler différentes combinaisons des leviers d'action à la disposition des aménageurs urbains. Nous sélectionnons un modèle intégré existant (TRANUS), auquel nous adossons un module de quantification des consommations énergétiques et des émissions de CO_2 (Signature Energétique des Transports Urbains, SETU) Le **chapitre 6** teste à l'aide de TRANUS-SETU la capacité des politiques transport et des politiques d'urbanisme à infléchir les trajectoires de consommations énergétiques liées aux transports urbains sur le cas de Bangalore (Inde).

Les travaux effectués sur les deux cas d'étude, Bogota (Colombie) et Bangalore (Inde), ne comparent pas les deux situations urbaines mais analysent au travers des spécificités locales des aspects différents de notre problématique générale. Ces deux terrains de recherche ne sont donc pas traités similairement dans la thèse ; ils éclairent, chacun, un point particulier de notre recherche.

6) Plan détaillé de la thèse

La **partie 1** de la thèse a pour objectif de récapituler ce que nous savons aujourd'hui d'une part des déterminants des consommations énergétiques et émissions de CO_2 liées aux déplacements urbains et d'autre part des leviers d'actions pour placer les transports urbains sur des trajectoires soutenables environnementalement.

Dans le **chapitre 1**, nous discutons les déterminants des consommations énergétiques liées aux transports urbains. Nous limitons notre analyse aux déterminants de la mobilité et de la répartition modale des déplacements. Nous ne traitons pas dans ce premier chapitre la question technologique de l'amélioration de l'efficacité environnementale de chaque mode de transport.

Nous présentons tout d'abord la diversité mondiale des niveaux de consommations énergétiques dans les transports urbains et infirmons l'hypothèse d'une corrélation entre ce niveau et la richesse de la ville **(section 1)**. Nous discutons ensuite deux analyses des déterminants des consommations énergétiques des transports urbains, ne mettant pas en avant les mêmes facteurs. Nous étudions dans un premier temps l'approche basée sur les travaux de Bertaud (2001) mettant en avant le rôle déterminant des politiques publiques urbaines menées sur le long terme sur la structure urbaine et par là sur les consommations énergétiques des transports urbains **(section 2)**. Nous analysons dans un second temps l'approche développée à partir des recherches de Schaeffer (1975) insistant sur les effets structurants des infrastructures de transport sur l'évolution de la structure urbaine **(section 3)**. Ces études nous conduisent à démontrer qu'une analyse des consommations énergétiques et émissions de CO_2 liées aux transports urbains doit être centrée sur le fonctionnement du couple « transport – usage des sols » **(section 4)**. Nous présentons ensuite les tendances actuelles des processus de structuration urbaine, qui sont inquiétantes **(section 5)**. Enfin, nous montrons par une comparaison entre Atlanta et Barcelone que ces tendances ne sont pas une fatalité **(section 6)**.

Dans le **chapitre 2**, nous discutons les différents leviers d'action à la disposition des aménageurs urbains pour placer les transports dans les villes du Sud sur des trajectoires environnementalement soutenables.

Nous démontrons tout d'abord la nécessité d'une planification d'anticipation et d'accompagnement, attentive aux dynamiques spontanées de structuration urbaine, et centrée sur le fonctionnement du couple « transport –usages des sols » **(section 1)**. Nous présentons ensuite les deux branches de la « tenaille » : des politiques transport et urbanisme intégrées et complémentaires susceptibles de maîtriser les consommations énergétiques et émissions de CO_2 liées aux transports dans les villes du Sud. Nous discutons tout d'abord les politiques visant à accroître la soutenabilité

environnementale de l'offre de transport urbain **(section 2)**. Nous analysons ensuite les outils dont dispose une municipalité pour influencer le développement spatial d'une ville et réduire le besoin de mobilité de ses citadins **(section 3).**

Les résultats des analyses développées dans la première partie de la thèse nous amènent à centrer la **partie 2** sur l'étude des relations fonctionnelles entre le système de transport et le système d'usage des sols définissant le couple « transport – usage des sols » et leurs effets sur les dynamiques de structuration urbaine.

Nous travaillons sur un exemple urbain concret, Bogota (Colombie), et étudions les relations fonctionnelles au sein du couple « transport – usage des sols » sur le long terme (chapitre 3) puis sur le court terme (chapitre 4).

Dans le **chapitre 3**, nous analysons depuis la fondation de Bogota en 1538 jusqu'à la fin du 20ème siècle les liens entre l'évolution du système transport et celle du système d'usage des sols, et les processus de structuration urbaine successivement engendrés.

Nous discutons dans un premier temps les quatre grandes phases de structuration urbaine qui se sont succédées sur le long terme : la densification d'une Bogota coloniale, de forme ovale et compacte car « ceinturée » jusqu'à la fin du 19ème siècle **(section 1)** ; l'expansion linéaire, du début du 20ème siècle jusqu'à la fin des années 1930, engendrée par la construction d'un tramway **(section 2)** ; la polycentralisation du début des années 1930 aux années 1970 **(section 3)** ; la consolidation et la recomposition interne de la forme et de la structure urbaine héritée des années 1970 à la fin des années 1990 **(section 4)**. Au travers de ces quatre sections, nous montrons que ce sont bien les relations fonctionnelles au sein du couple « transport – usage des sols » qui sont au cœur des dynamiques de structuration urbaine et donc des consommations énergétiques liées aux déplacements urbains. Des équilibres successifs s'établissent entre la distribution spatiale des résidences et des activités, générant une demande de mobilité, et le système de transport, caractérisant une offre de mobilité. La situation de la mobilité, l'activité de production foncière et immobilière, la planification urbaine et la politique d'investissement dans les infrastructures de transport sont interdépendantes et co-déterminées. Nous discutons enfin les analyses développées à la fin du 20ème siècle sur les causes de la crise de la mobilité et les réponses apportées par les autorités **(section 5)**.

Dans le **chapitre 4**, nous analysons les effets de l'introduction d'une infrastructure de Transport Rapide de Masse, le Bus Rapid Transit (BRT) TransMilenio, sur les systèmes d'usage des sols et de transport et leurs conséquences sur les dynamiques de structuration urbaine. Nous tirons de cette analyse des enseignements sur les relations fonctionnelles au sein du couple « transport – usage des sols » et leurs effets structurants sur la structure urbaine.

Nous quantifions et qualifions les réactions des marchés foncier et immobiliers à l'introduction du BRT TransMilenio **(section 1)**. Nous analysons un premier aspect de l'évolution des dynamiques d'occupation de l'espace urbain liée à l'introduction d'une infrastructure de transport : l'intensité de l'usage des sols le long des corridors BRT **(section 2)**. Nous étudions un second aspect des effets du BRT sur les dynamiques d'occupation de l'espace urbain : les évolutions de l'usage des sols le long des corridors BRT **(section 3)**. Nous examinons les effets du BRT sur les périphéries de l'agglomération **(section 4)**. Enfin nous analysons les effets du TransMilenio sur la mobilité urbaine et notamment la matrice Origines – Destinations des déplacements urbains **(section 5)**.

Nous avons montré dans les deux premières parties de la thèse que les interactions « transport – usage des sols » sont déterminantes pour la structure urbaine et par là pour le niveau d'énergie consommée dans les déplacements urbains mais aussi qu'elles sont extrêmement complexes. Les paramètres intervenant dans les relations fonctionnelles au sein du couple « transport – usage des sols » sont multiples, interdépendants et co-déterminés. Ces résultats nous conduisent à focaliser la **partie 3** de la thèse sur la recherche d'un outil de simulation des dynamiques de structuration urbaine, basé

sur une compréhension approfondie des mécanismes de choix de localisations et de transports, (chapitre 5) et son application pour tester la capacité des politiques présentées dans le chapitre 2 à infléchir significativement les trajectoires de consommations énergétiques liées aux transports urbains (chapitre 6).

Dans le **chapitre 5**, nous évaluons les outils de simulation des relations fonctionnelles au sein du couple « transport – usage des sols » existants, nous justifions le choix de TRANUS comme le modèle le plus adapté à notre projet de recherche et le complétons par un module de quantification des consommations énergétiques et des émissions de CO_2.

Nous présentons tout d'abord les critères requis pour le choix de l'outil de simulation capable de répondre à la question initiale de la thèse **(section 1)**. Ces critères sont le résultat des analyses menées dans les deux premières parties de cette thèse. Nous exposons ensuite les différentes familles de modèles produits par les sciences de la ville. Nous concluons par l'intérêt des modèles interactifs « transport – usage des sols » pour les objectifs de notre recherche **(section 2)**. Puis nous étudions les différentes catégories de modèles interactifs pour nous focaliser sur les modèles de prévision quasi-dynamiques parmi lesquels nous choisissons TRANUS comme le modèle le plus pertinent pour simuler différentes combinaisons des leviers d'action à la disposition des aménageurs urbains et construire des trajectoires de consommation énergétique et d'émission de CO_2 **(section 3)**. Enfin, nous exposons TRANUS en détail et le complétons par la Signature Energétique des Transports Urbains (SETU), traduction en terme de consommation d'énergie et d'émission de CO_2 des effets des politiques de transport et d'urbanisme sur la structuration urbaine **(section 4)**.

Le **chapitre 6** teste à l'aide de TRANUS-SETU la capacité des politiques de transport et d'urbanisme intégrées et complémentaires, discutées dans le chapitre 2, à infléchir significativement les trajectoires de consommations énergétiques liées aux transports urbains sur un cas urbain concret.

Puisque chaque ville est spécifique, nous travaillons sur un exemple urbain emblématique, Bangalore (Inde), et répondons à notre question initiale sur la capacité de l'offre technologique en transport urbain, accessible à une ville du Sud, à répondre aux exigences de durabilité environnementale pour les villes pauvres à croissance démographique rapide.

Nous présentons notre cas d'étude, Bangalore **(section 1)**, puis nous décrivons les différentes étapes de l'application de TRANUS et de SETU **(section 2)**, nous discutons les scénarii que nous choisissons de tester **(section 3)**, nous analysons les résultats **(section 4)** et enfin nous concluons **(section 5)**.

7) Résultats et conclusions

Les conclusions de la thèse sont :

1) Les villes pauvres à croissance démographique rapide disposent de technologies de transport accessibles pour infléchir leurs trajectoires de consommations énergétiques et émissions de CO_2 liées aux transports urbains ;

2) Certaines de ces technologies, comme le BRT, sont le résultat de véritables innovations, développées dans et par les villes du Sud, par adaptation locale et montage institutionnel original de techniques génériques ;

3) Les villes pauvres disposent également d'outils d'aide à la décision capables de quantifier des alternatives de politiques urbaines et donc d'aider à la mise en place de stratégies durables de développement urbain ;

4) La tâche prioritaire des politiques urbaines est d'anticiper et d'accompagner les dynamiques de marché qui structurent l'espace urbain ;

5) Pour contraindre l'étalement urbain diffus, il est indispensable de coupler à l'introduction d'une infrastructure de Transport Rapide de Masse (TRM) une vigoureuse politique d'usage des sols ;

6) Des politiques réalistes de transport et d'urbanisme intégrées et complémentaires permettent des inflexions significatives sur le long terme des consommations énergétiques et des émissions de CO_2 liées aux transports urbains des passagers.

La thèse montre ainsi qu'un renouvellement des paradigmes technologiques n'est pas indispensable et encore moins une révolution des valeurs et des mentalités. La boîte à outil est bonne mais l'ouvrier ne l'utilise pas assez.

La thèse démontre que, à l'instar du bâtiment, le problème de la croissance tendancielle inquiétante des consommations d'énergie dans les transports urbains n'est pas principalement d'ordre technologique. Il est politique et institutionnel. Il s'agit d'établir un cadre incitant d'une part les autorités compétentes à adopter des programmes intégrant les politiques de transport et d'urbanisme dans une stratégie de réduction des émissions de CO_2 urbaines et d'autre part les investissements privés à se localiser dans l'espace urbain de façon à construire une ville plus économe en énergie.

Partie 1

Chapitre 1 : Les déterminants des consommations énergétiques des transports urbains. Analyse de la littérature.

Chapitre 2 : Les moyens à la disposition des aménageurs urbains.

Chapitre 1 : Les déterminants des consommations énergétiques des transports urbains. Analyse de la littérature.

Ce premier chapitre a pour objectif de récapituler ce que nous savons aujourd'hui des déterminants des consommations énergétiques liées aux transports urbains et des évolutions récentes de ces déterminants. Il s'appuie sur une revue critique de la littérature.

L'IEA synthétise les paramètres à prendre en compte pour mesurer les pollutions liées aux transports dans son approche ASIF. Les émissions polluantes (C02 compris) sont le produit de quatre ensembles de paramètres (Schipper, Marie-Lilliu, Gorham, 2000 ; Fulton, Schipper, 2001 ; Schipper, 2002) :

A, (« *Acitivity* ») : l'activité totale de déplacement (passenger-km ou tonne-km) ;

S, (« *Structure* ») : la répartition modale des déplacements (% par mode de transport) ;

I, (« *energy Intensity* ») : l'intensité énergétique de chaque mode de transport (carburant/passenger-km ou carburant/tonne-km) ;

F, (« *« carbon » factor effect for the mix of Fuels used* ») : les émissions de polluants par quantité de combustible consommé pour chaque type de combustible utilisé dans chaque mode de transport (émissions de polluants par quantité de combustible consommé) ;

Dans ce chapitre 1 nous ne discutons pas la question technologique de l'amélioration de l'efficacité environnementale de chaque mode de transport[5] (les paramètres I et F). Nous nous intéressons au problème plus complexe des déterminants de l'activité totale de déplacement et de la répartition modale de ces déplacements (les paramètres A et S).

La première section présente la diversité mondiale des niveaux de consommations énergétiques dans les transports urbains et infirme l'hypothèse d'une corrélation entre ce niveau et la richesse de la ville.

Nous présentons ensuite deux analyses des déterminants des consommations énergétiques des transports urbains. Ces deux approches ne mettent pas en avant les mêmes facteurs.

La deuxième section démontre le rôle déterminant des politiques publiques urbaines menées sur le long terme sur la structure urbaine et par là sur les consommations énergétiques des transports urbains.

La troisième section présente les effets structurants des infrastructures de transport sur l'évolution de la structure urbaine.

Ainsi ces deux analyses n'insistent pas sur le même aspect de la relation systémique entre le système de transport et le système d'usage des sols, mais s'accordent sur le fait que cette relation détermine les consommations d'énergie et les émissions de CO_2 liées aux transports urbains.

Cela nous conduit à démontrer en quatrième section qu'une analyse des consommations énergétiques et des émissions de CO_2 liées aux transports urbains doit être centrée sur le fonctionnement du couple « transport – usage des sols ». Ce couple est au cœur des dynamiques de structuration de l'espace urbain, et par là des consommations énergétiques engendrées par les transports urbains.

La cinquième section présente les tendances actuelles des processus de structuration urbaine, qui sont inquiétantes.

La sixième section montre par une comparaison entre Atlanta et Barcelone que ces tendances ne sont pas une fatalité.

[5] Cette question de l'efficacité environnementale des technologies de transport et de son évolution sera traitée dans le chapitre 2.

I - Les consommations énergétiques dans les transports urbains : une grande diversité qui ne s'explique pas par le PIB urbain

A - *Vue d'ensemble : une grande diversité des niveaux de consommations énergétiques dans les transports urbains*

Une étude de Kenworthy (Kenworthy, 2003), portant sur 84 « villes globales » donne de précieux éléments de comparaison, et montre l'extrême diversité des niveaux de consommations énergétiques liées aux transports urbains dans les villes actuelles. (Cf. Tableau 2 et aussi le graphe 1 ci-dessous).

Tableau 2 : Consommations d'énergie dans les transports urbains de 84 grandes villes (moyennes par zones, chiffres de 1995)

USA	ANZ	CAN	WEU	HIA	EEU	MEA	LAM	AFR	LIA	CHN
PIB / hab en USD										
31 386	19 775	20 825	32 077	31 579	5 951	5 479	4 913	2 820	3 753	2 366
Densités urbaines (hab / ha)										
15	15	26	55	150	53	119	75	60	204	146
Consommation d'énergie dans les transports (MJ / hab / an)										
60 843	30 405	33 563	16 793	10 979	7 903	11 172	9 441	7 706	6 635	2.917
Emissions de CO_2 dans les transports (kg / hab / an)										
4 405	2 226	2 422	1 269	825	694	812	678	592	509	213
Consommation d'énergie dans les transports privés (MJ / 1000$ de PIB annuel)										
1 913	1 497	1 562	489	303	1 119	1 930	1 477	2 193	1 471	1. 055
Offre de transport particulier (nb. de véhicules (autos+motos)) / 1000 hab)										
600	589	539	446	298	352	153	216	140	233	81
Offre de transport particulier (nb. de véhicules (autos+motos)) / 1000 $ de PIB annuel)										
19	30	26	14	10	59	28	44	50	64	43
Mobilité en transport individuel (pass.km / hab / an)										
18 200	11 468	8 666	6 321	3 971	2 926	3 391	2 966	2 709	2 539	1.103
Mobilité en transport en commun (% pass.km motorisés réalisés en transport en commun)										
2,9%	7,5%	9,8%	19%	45,9%	53%	29,5%	48,2%	50,8%	41%	55%
Longueur d'autoroutes urbaines / hab (m /1000 hab)										
156	129	122	82	20	31	53	3	18	15	3
Longueur de voies en sites propres pour transport en commun : hab (m / 1000 hab)										
49	215	55	192	53	221	16	19	40	16	2

USA: Etats-Unis; ANZ: Australie – Nouvelle Zélande; CAN: Canada; WEU: Western Europe ; HIA : High Income Asia ; EEU : Eastern Europe ; MEA : Middle East ; LAM : Latin America ; AFR : Africa ; LIA : Low Income Asia ; CHN : Chine.
Source : Millennium Cities Database for Sustainable Transport, cité dans Kenworthy, 2003.

Nous présentons en annexe (Annexe 1) la liste des villes considérées par Kenworthy (Kenworthy, 2003) pour constituer cette comparaison.

Les villes des Etats-Unis consomment en moyenne vingt et une fois moins d'énergie par habitant et par an que les villes chinoises (60.843 MJ/hab/an contre 2.917 MJ/hab/an). Les habitants des villes australiennes et canadiennes consomment en moyenne deux fois moins d'énergie par an pour leurs déplacements que les citadins des Etats-Unis. Les citadins d'Europe de l'Ouest consomment pour leurs déplacements moitié moins d'énergie que les citadins canadiens et australiens, et deux fois plus que les citadins d'Europe de l'Est. Les émissions de CO_2 dues aux transports urbains sont liées aux consommations d'énergie et présentent donc la même diversité entre les villes mondiales.

Au niveau des villes, les extrêmes sont Atlanta avec 7.455 kg par habitant et par an et Hô-Chi-Minh-Ville avec 71 kg, soit 105 fois moins. Quant à la part des transports en commun (versus individuels) dans ces émissions elle va de plus de 70% à Manille ou à Dakar (50 % à Cracovie), à moins de 1 % à Atlanta, mais aussi à Riyad.

B - *La richesse n'explique pas cette diversité*

Contrairement à ce qu'on pourrait croire, **la richesse, mesurée par le PIB annuel par habitant urbain, n'est pas un facteur fortement corrélé avec le taux de motorisation individuelle.** De plus, **à taux de motorisation similaire, l'utilisation effective de l'automobile peut varier considérablement d'une ville à l'autre** (Kenworthy, 2003).

Il en résulte que les consommations énergétiques liées au transport privé rapportées à la richesse, mesurées en MJ / $1000 de PIB, n'augmentent pas systématiquement avec le PIB par habitant. Les niveaux les plus élevés sont atteints par trois groupes de villes : les villes africaines : 2.200 MJ / $1000 de PIB et les villes des Etats-Unis et du Moyen-Orient : 1900 MJ / $1000 de PIB. Les villes d'Europe de l'Ouest et de l'Asie riche sont les plus performantes avec seulement 489 et 303 MJ / $1000 de PIB respectivement. Les autres régions se situent entre ces extrêmes, avec une moyenne de 1.364 MJ / $1000 de PIB. (Kenworthy, 2003)

De même, Kenworthy (Kenworthy, 2003) montre que **le niveau de richesse n'est fortement corrélé ni avec l'offre d'infrastructures routières, ni avec l'offre de transports en commun.**

Ainsi l'offre d'autoroutes urbaines par habitant est particulièrement importante aux Etats-Unis (156 m/ 1000 hab), en Australie et en Nouvelle-Zélande (83% du niveau américain), et au Canada (78% du niveau américain). Dans les autres régions, le réseau autoroutier urbain est faible, particulièrement en Amérique Latine et en Chine (2% du niveau américain). Si l'on rapporte cette offre d'autoroutes urbaines à la richesse (et non au nombre d'habitant), les résultats s'inversent : les villes pauvres offrent un peu plus d'autoroutes urbaines que les villes riches : 4.5 km contre 4.1 km / $1000 de PIB. En fait, les villes africaines, d'Europe de l'Est et du Moyen-Orient offrent déjà plus de kilomètres d'autoroutes par $1000 de PIB que les villes américaines. Ce phénomène, qui se traduit concrètement par la prolifération des ponts et des rocades périphériques dans les villes émergentes, est inquiétant pour l'effet de serre. Est-il inévitable? Certainement pas : puisqu'on a vu que parmi les villes riches l'usage de l'automobile est très variable, il n'y a a priori aucune raison que le modèle nord américain et australien soit le seul modèle réplicable dans le Sud.

L'offre de transport public, évaluée en siège-km par habitant et par an est en moyenne peu différente entre villes riches et villes pauvres : 3.336 pour les régions riches et 3.203 pour les régions pauvres. Par contre, relativement à la richesse, les villes pauvres fournissent une quantité de transport en commun bien supérieure : 831 sièges-km / $1000 PIB à celle offerte par les villes riches : 126 sièges-km / $1000 PIB. Par ailleurs, les villes d'Europe de l'Ouest et de l'Est, les villes riches d'Asie et dans une moindre mesure les villes australiennes et néo-zélandaises sont les seules régions à offrir des réseaux de sites propres significatifs pour les transports en commun. La Chine pour les régions pauvres et les Etats-Unis pour les régions riches ont des réseaux de sites propres particulièrement réduits. En moyenne, les villes riches ont ainsi un réseau en site propre par habitant largement supérieur (113 m / 1000 pers) aux villes pauvres (49 m / 1000 pers). Cependant, si on compare ces réseaux en site propre à la richesse, les conclusions s'inversent ici aussi : les villes pauvres offrent un peu plus du double de sites propres que les villes riches : 10.0 km contre 4.6 km / $1000 de PIB. Sans surprise, les transports en commun, comme d'ailleurs la marche et le vélo, sont donc, relativement à la richesse, beaucoup plus développés dans les villes pauvres.

Pour les villes du Sud connaissant une explosion démographique, il s'agit donc avant tout de résister à la pénétration de l'automobile, ce qui est a priori beaucoup plus facile que de la faire régresser quand elle s'est imposée comme le seul moyen praticable de déplacement, en raison d'une structure urbaine étalée qu'elle a elle-même contribué à façonner. Dans les villes du Sud il s'agit en effet plus de conserver la répartition modale des déplacements aujourd'hui à l'avantage des transports en commun et non-motorisés que de renverser une distribution modale en faveur des automobiles. Les

densités urbaines généralement fortes dans les villes du Sud offrent donc un avantage qu'il s'agit de mettre à profit pour développer une mobilité peu énergétivore.

Enfin la mise en parallèle de l'usage des transports en commun et des parts modales montre que l'**on ne peut pas étudier un mode de transport séparément de l'ensemble du système des transports urbains**. Ainsi, par exemple, la Chine, malgré un faible niveau de service de transport en commun, présente un taux d'utilisation des transports en communs élevé (375 déplacements/hab/an) lié à la captivité des passagers. Ces chiffres sont à opposer à la faible part modale des transports en commun (19% des déplacements) due à l'importance de la bicyclette et de la marche à pied (65% des déplacements totaux). De même les villes canadiennes se distinguent des autres «villes – automobiles» (des Etats-Unis, australiennes, néo-zélandaises et du Moyen-Orient) par un niveau d'utilisation des transports en commun deux fois plus important qu'aux Etats-Unis, en Australie et en Nouvelle-Zélande.

Ces observations mettent en évidence **l'importance des facteurs urbanistiques et de l'existence d'alternatives à l'usage de l'automobile dans la consommation énergétique des transports d'une ville**. Ils confirment l'assertion de Litman et Laube (2002) selon qui : « Beaucoup de régions riches ont des systèmes de transports urbains équilibrés, alors que certaines régions pauvres sont très dépendantes de l'automobile. La différence vient des politiques publiques qui influencent les choix de transports et l'usage des sols[6]».

Encadré 1 : Définition des concepts de « déplacement », « trafic », « mobilité », « accessibilité » et « proximité ».

1) <u>Le déplacement</u>
Le déplacement est défini comme le résultat de l'action d'aller d'un lieu à un autre (Grand Dictionnaire Encyclopédique Larousse, 1984).

2) <u>Le trafic :</u>
Le trafic est défini comme « l'ensemble des déplacements de véhicules qui s'effectuent pendant une durée définie sur une voie de communication » (Grand Dictionnaire Encyclopédique Larousse, 1984).
Le trafic est mesuré en (véhicule x kilomètres parcourus).
L'« approche trafic » des émissions polluantes liées aux transports urbains définie par Litman (Litman, 2007) vise à réduire les émissions polluantes par unité de véhicule roulant. Elle est centrée sur la vitesse des véhicules et la congestion est le problème essentiel. Les moyens d'action sont alors, par exemple, d'augmenter la capacité du réseau routier, de promouvoir une urbanisation de faible densité, de décongestionner le centre urbain, d'augmenter les places de stationnement, etc.
Un indicateur associé à cette « approche trafic » est les émissions émises par (véhicule x km).
Cette « approche trafic » se focalise sur I et F de l'équation ASIF (cf. introduction du chapitre).

3) <u>La mobilité :</u>
La mobilité est définie comme la distance des déplacements des personnes ou des biens.
La mobilité est mesurée en (passager x kilomètres parcourus) ou en (bien x kilomètres parcourus).
L' « approche mobilité » des émissions polluantes liées aux transports urbains définie par Litman (Litman, 2007) vise à réduire les émissions polluantes par unité de passager ou de bien transporté. Elle est centrée sur le mouvement des personnes et des biens, et non des véhicules. Les moyens d'action sont alors, par exemple, d'augmenter le taux d'occupation des véhicules, de donner la priorité aux

[6] "Many wealthier regions have balanced transportation systems while some poorer regions are quite automobile dependent. The differences result from public policies that affect transport choices and land use patterns"

transports en commun en terme d'espace et de financement, etc. Ainsi, réduire le trafic est envisageable si cela améliore la mobilité des personnes.
Un indicateur associé à cette « approche mobilité » est les émissions par (passager x km).
Cette « approche mobilité » se focalise sur le S de l'équation ASIF.

4) <u>L'accessibilité :</u>
L'accessibilité se définit comme « la possibilité qu'a quelqu'un d'accéder à, d'arriver à, d'avoir quelque chose » (Grand Dictionnaire Encyclopédique Larousse, 1984). L'accessibilité définit donc la facilité pour des acteurs économiques d'atteindre des opportunités (biens, services, activités, destination etc.). L'accessibilité est un indicateur du potentiel d'interaction spatiale.
L'accessibilité est mesurée par le nombre de déplacements par habitant ou par le coût généralisé (temps, argent, effort physique, risque etc.) nécessaire pour atteindre l'opportunité désirée. Lorsque le coût financier marginal est relativement faible (par exemple pour une personne possédant une voiture), la durée du déplacement tend à être la composante dominante de l'accessibilité.
L'« approche accessibilité » des émissions polluantes liées aux transports urbains définie par Litman (Litman, 2007) vise à réduire les émissions polluantes par unité d'opportunité urbaine atteinte. L'accessibilité peut être augmentée en réduisant le trafic et même la mobilité, comprise alors comme le résultat d'un besoin de se déplacer. Les moyens d'action sont alors, par exemple, de limiter le taux de motorisation, de promouvoir les déplacements non motorisés, d'offrir des alternatives à la voiture, de planifier le développement urbain afin de réduire le besoin de mobilité pour atteindre les opportunités recherchées, de restreindre les places de stationnement, de favoriser les télécommunications, etc.
Un indicateur associé à cette « approche accessibilité » mesurerait les émissions par habitant ou par opportunité atteinte. Le bon indicateur reste à définir (Litman, 2007).
Cette « approche accessibilité » vise à agir sur le A de l'équation ASIF.

5) <u>La proximité</u>
La proximité se définit comme la faible distance entre deux points.
La proximité est mesurée en mètres.
Le concept de proximité est à différencier du concept d'accessibilité du fait de la congestion et des différences de vitesse entre les modes de transport qui entraînent qu'une faible distance géographique n'est pas synonyme d'un accès facile.

L'accessibilité est donc un concept plus large que la mobilité. Elle permet d'intégrer les notions d'intensité et de mixité fonctionnelle et sociale dans l'usage des sols.
A Paris, par exemple, la forte densité d'emploi explique une répartition modale des déplacements très en faveur des transports en commun, même si leur vitesse porte-à-porte n'est pas élevée (9 km/H). En trente minutes, un actif habitant Paris peut atteindre un bassin de 1,5 million d'emplois. En raison d'une densité d'emploi vingt fois plus faible qu'à Paris, les actifs résidant en banlieue ont besoin d'avoir accès à un territoire dix fois plus étendu pour atteindre un bassin d'emploi équivalent et donc de se déplacer trois fois plus vite pour y accéder en trente minutes. Ainsi, en banlieue, seule l'automobile permet d'atteindre un univers de choix équivalent à celui offert par les transports en commun dans la capitale. (Fouchier, 1996)

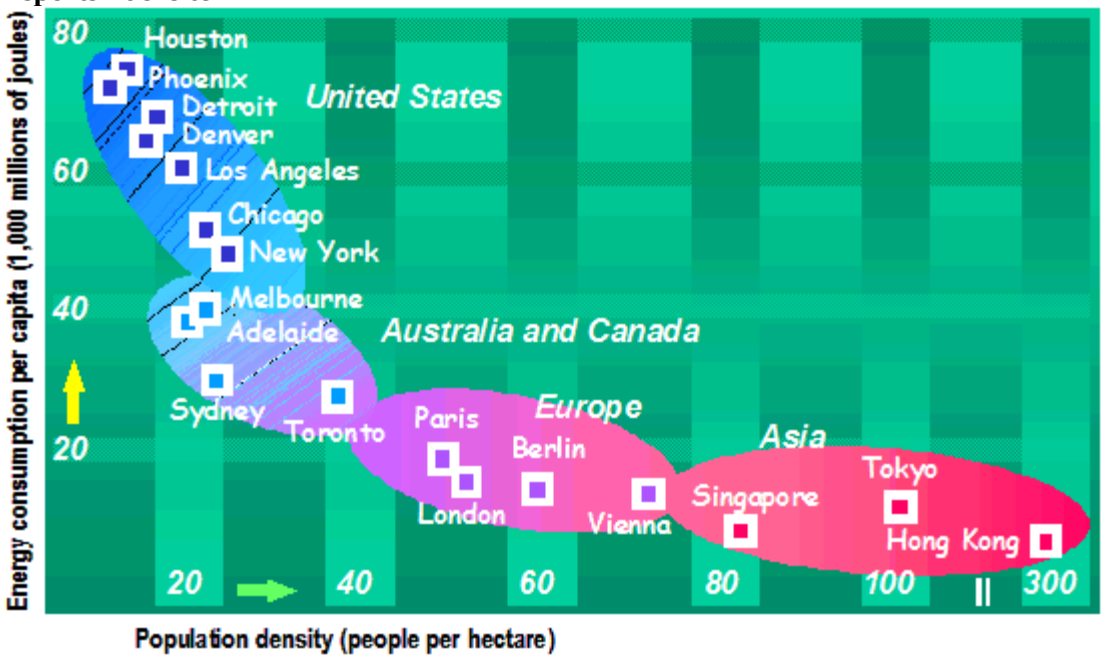
II - L'usage des sols, déterminant des consommations énergétiques dans les transports urbains

A - *Densité urbaine moyenne et répartition modale des déplacements, (Newman, Kenworthy,1999)*

Conduites depuis une quinzaine d'années, les recherches de Newman et Kenworthy (Newman, Kenworthy, 1999) sur la dépendance automobile et sur le développement urbain durable mettent en avant la **forte corrélation entre les densités urbaines moyennes, la répartition modale des déplacements et les consommations d'énergie dans les transports urbains.**

Newman et Kenworthy ont en particulier construit une célèbre hyperbole «consommations énergétiques des transports – densité» :

Graphe 1 : L'hyperbole de Newman et Kenworthy : Consommations énergétiques dans les transports - densité



Source : Newman, Kenworthy, 1999

La corrélation entre la densité d'urbanisation moyenne en habitants par hectare et la consommation d'énergie par personne est forte : $R^2 = 0,86$.

Ces résultats sont dus à ce que la densité est fortement corrélée aux répartitions modales et à l'intensité d'usage de l'automobile, comme le montre le tableau suivant.

Tableau 3 : Typologie des villes fondée sur la densité métropolitaine moyenne et les transports

Densité urbaine globale	**Faible** < 25 hab/ ha	**Intermédiaire** 50 – 100 hab / ha	**Forte** > 250 hab+/ ha
Répartition modale	TIM : 80 % TP : 10 % TNM : 10 %	TIM : 50 % TP : 25 % TNM : 25 %	TIM : 25 % TP : 50 % TNM : 25 %
Utilisation de l'automobile (km / pers / an)	> 10 000		< 5 000
Utilisation du transport public (dépl. / pers / an)	< 50		> 250
Consommation d'essence dans les transports (MJ / pers / an)	> 55 000	35 000 – 20 000	< 15 000
Situations représentatives	**Métropoles nord-américaines et australiennes**	**Métropoles européennes**	**Métropoles asiatiques**

Source: Newman, Kenworthy., 1999.
TIM : transport individuel motorisé. TP : transport public. TNM : transport non motorisé
Densité : nombre d'habitants et d'emplois par hectare de surface urbaine nette (sans espaces verts, ni plans d'eau)

Ainsi, les aires métropolitaines à faible densité connaissent une prédominance quasi-absolue de l'automobile et la consommation totale d'énergie dans les transports est considérable (souvent plus de 65.000 MJ/personne/an). Il existe de très amples variations dans cette catégorie entre les métropoles à très faible densité moyenne, telles Houston, Phœnix, Atlanta, Brisbane ou Perth et une métropole telle que Toronto dont la densité trois fois plus élevée est proche des métropoles européennes.

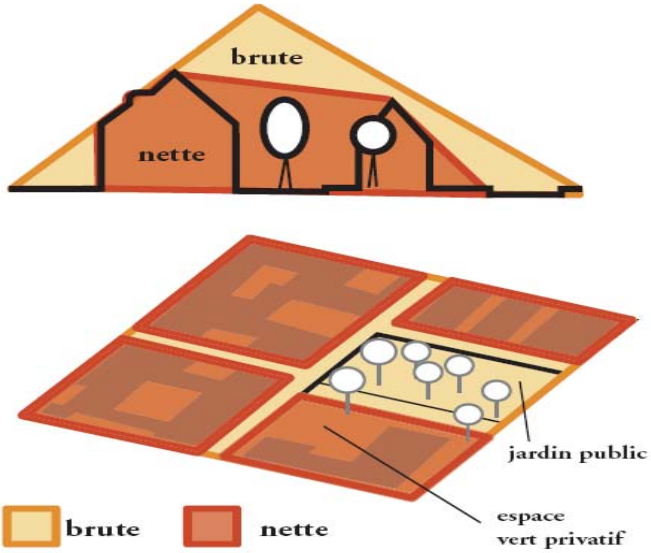
Les métropoles à forte densité ont une répartition tri modale nettement plus équilibrée avec un avantage marqué pour le transport public (entre 40 et 60 % des déplacements). La consommation totale d'énergie dans les transports est quatre à sept fois moins importante que dans les métropoles à faible densité. Le cas extrême de cette catégorie est Hong Kong.

Les métropoles européennes occupent une position intermédiaire en terme de densité urbaine : entre 40 et 120 (habitants+emplois) par hectare net. La répartition modale est plus équilibrée mais laisse un avantage marqué à l'automobile qui connaît un développement soutenu dans les couronnes extérieures à faible densité urbaine. La consommation totale d'énergie dans les transports est deux à quatre fois moins importante que dans les métropoles à faible densité.

Encadré 2 : Densités urbaines (IAURIF, 2005)

La densité urbaine mesure le rapport du nombre d'habitants par unité de surface.
Mais, pour établir ces mesures, quelle surface prendre en compte : la parcelle, l'îlot, le quartier ? Faut-il inclure ou exclure les équipements publics, la voirie, les espaces verts, les zones d'activité ?
Ainsi on distingue la densité brute de la densité nette.

La densité nette et la densité brute
La distinction entre la densité brute et la densité nette provient du choix de la surface de référence choisie. La densité nette ne prend en compte que les surfaces des parcelles réellement occupées par l'affectation donnée : emprise du bâti, espaces libres à l'intérieur de la parcelle ou de l'îlot, voies de desserte interne.
La densité brute prend en compte l'ensemble du territoire considéré sans exclusion : équipements collectifs (bâtis ou non), espaces verts, voirie principale et infrastructures. Suivant le type de tissu urbain (largeur des voies, importance des espaces libres), la densité peut varier considérablement.



D'autres mesures de densité peuvent être utiles :
- La **densité résidentielle** (logements/ha) permet de donner une mesure de l'occupation du sol par le logement.
- La **densité d'emplois** (emplois/ha) permet d'identifier les espaces concentrant le plus d'emplois.
- La **densité d'activité humaine** (habitants + emplois/ha) permet de mesurer en partie la densité d'usage d'un espace ; elle prend en compte le nombre potentiel de personnes fréquentant le site. Ce ratio permet de repérer les effets de centralité et de comparer des tissus urbains différents

Si les conclusions générales de Newman et Kenworthy ne sont pas remises en cause, plusieurs critiques ont été faites.

Gomez-Ibanez (Gomez-Ibanez, 1991), Steiner (Steiner, 1994), Handy (Handy, 1996), Gordon (Gordon, 1989, 1991), Bae (Bae, 1993) et Gordon et Richardson (Gordon, Richardson, 1988, 1989, 1995) pointent tout d'abord des problèmes méthodologiques qui d'une part tendent à fausser le diagnostic et d'autre part rendent les prescriptions non-appropriées et inapplicables. Tout d'abord les travaux de Newman et Kenworthy relèvent d'une approche agrégée basée sur la construction de moyennes sur l'agglomération pour toutes les variables considérées. Ainsi non seulement les différences au sein de l'aire urbaine sont ignorées mais de plus la délimitation de l'aire urbaine elle-même pose question. La frontière choisie pour la ville est déterminante pour la valeur de la moyenne. Gordon et Richardson (Gordon, Richardson, 1989), Gomez-Ibanez (Gomez-Ibanez, 1991) et Breheny (Breheny, 1991) émettent alors des réserves quant à la fiabilité des données utilisées. Ensuite Newman et Kenworthy ont ignoré les effets du revenu des ménages et du prix des carburants sur leur consommation, les effets du revenu des ménages sur la densité. De même les différences dans l'efficacité énergétique des véhicules ne sont pas prises en compte. Enfin la distribution spatiale des activités et des ménages n'est pas analysée. Cette structure spatiale détermine le nombre et la longueur des déplacements ; on ne peut pas arrêter l'analyse à la simple densité moyenne. Ainsi, par exemple, Newman et Kenworthy négligent la sub-urbanisation des entreprises qui a récemment accompagné l'étalement des villes américaines. La co-localisation décentralisée des emplois et des ménages a réduit et non allongé les temps et les distances des déplacements domicile-travail (Gordon et al, 1989, 1991, Bae, 1993). Cette «superficialité» dans l'analyse conduit à ce que Breheny (Breheny, 1991) appelle «*an obsession with density*».

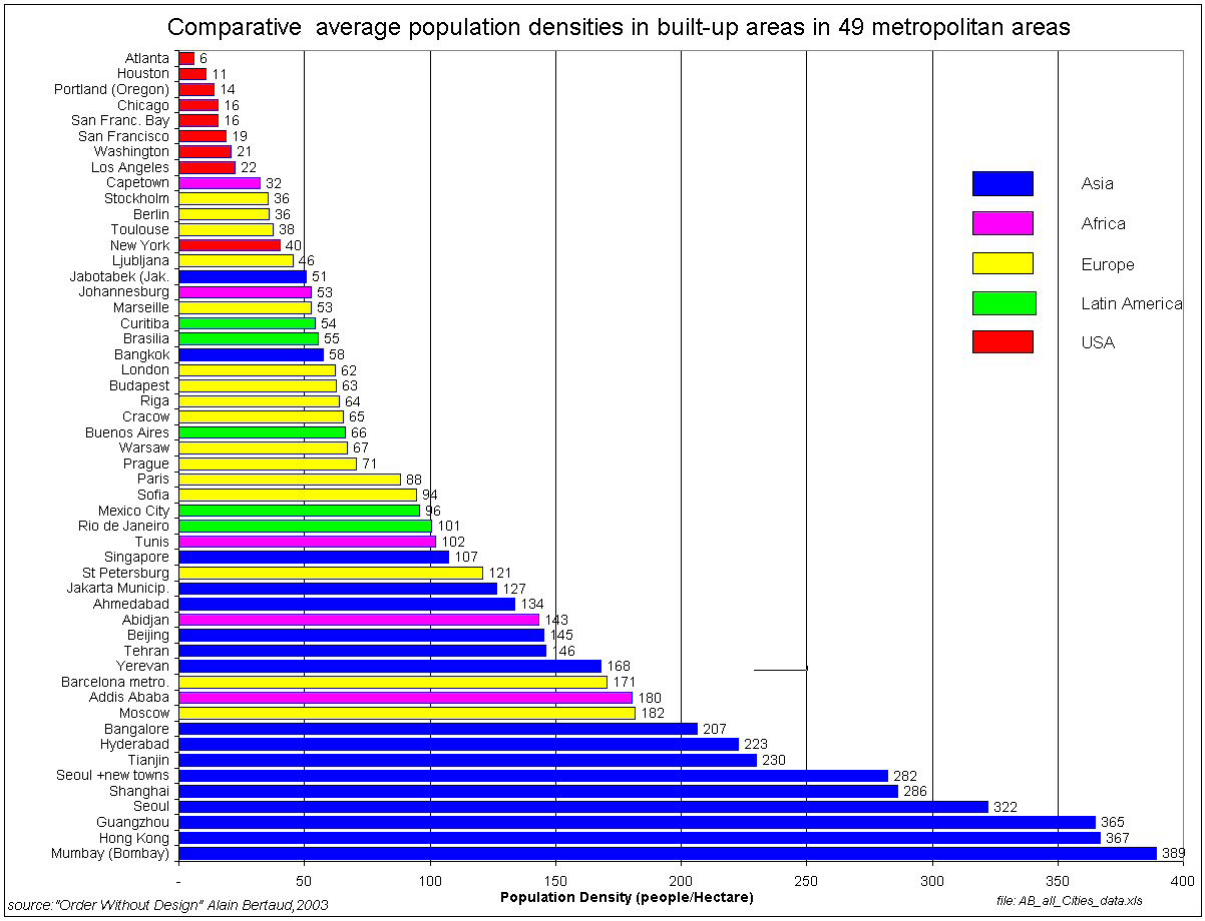
Gordon et Richardson (Gordon, Richardson, 1989) et Kirwan (Kirwan, 1992) montrent que la corrélation de Newman et Kenworthy est particulièrement affaiblie voire disparaît une fois que la richesse par habitant est contrôlée. Bertaud (Bertaud, 2003) a estimé avec différents modèles les déterminants des consommations de pétrole utilisés par Newman et Kenworthy (Newman, Kenworthy, 1989), et a montré que, par exemple, le contrôle du revenu et du prix du pétrole affaiblissaient les résultats de Newman et Kenworthy. Le coefficient de densité devient même non-significatif dans certains modèles, et significatif mais faiblement dans d'autres.

Nous retenons de ces critiques l'idée, fondamentale pour nous, que la relation entre la forme urbaine et l'efficience énergétique est bien plus compliquée à démêler. **Les approches agrégées ont une portée limitée aussi bien dans la compréhension des déterminants des consommations énergétiques que dans l'élaboration d'une stratégie de long terme pour infléchir leur croissance.**

B - *La densité moyenne n'est fonction ni de la richesse urbaine, ni de la taille de la population urbaine mais des politiques urbaines (Bertaud, 2003)*

Bertaud (Bertaud, 2003), dans une comparaison entre 49 mégapoles, montre qu'il n'y a **aucune corrélation claire ni entre la densité et la richesse, ni entre la densité et la taille de la population.** Par contre, il y a une relation claire entre la densité d'une ville et sa localisation continentale. Les villes américaines ont de faibles densités ; les villes européennes, africaines et sud-américaines ont des densités moyennes ; les villes asiatiques ont de fortes densités. Ceci suggère que **les densités sont fortement influencées par des facteurs historiques et culturels, et donc les politiques urbaines menées sur le long terme.**

Graphe 2 : Comparaison de la densité moyenne de 49 mégapoles



Source : Bertaud, 2003.

D'autre part, Bertaud remarque que toutes les villes présentées dans la figure ci-dessus sont des villes connaissant un relatif succès économique, ou en tout cas sont les principaux moteurs économiques des pays auxquels elles appartiennent. Le large spectre de densités rencontrées prouve

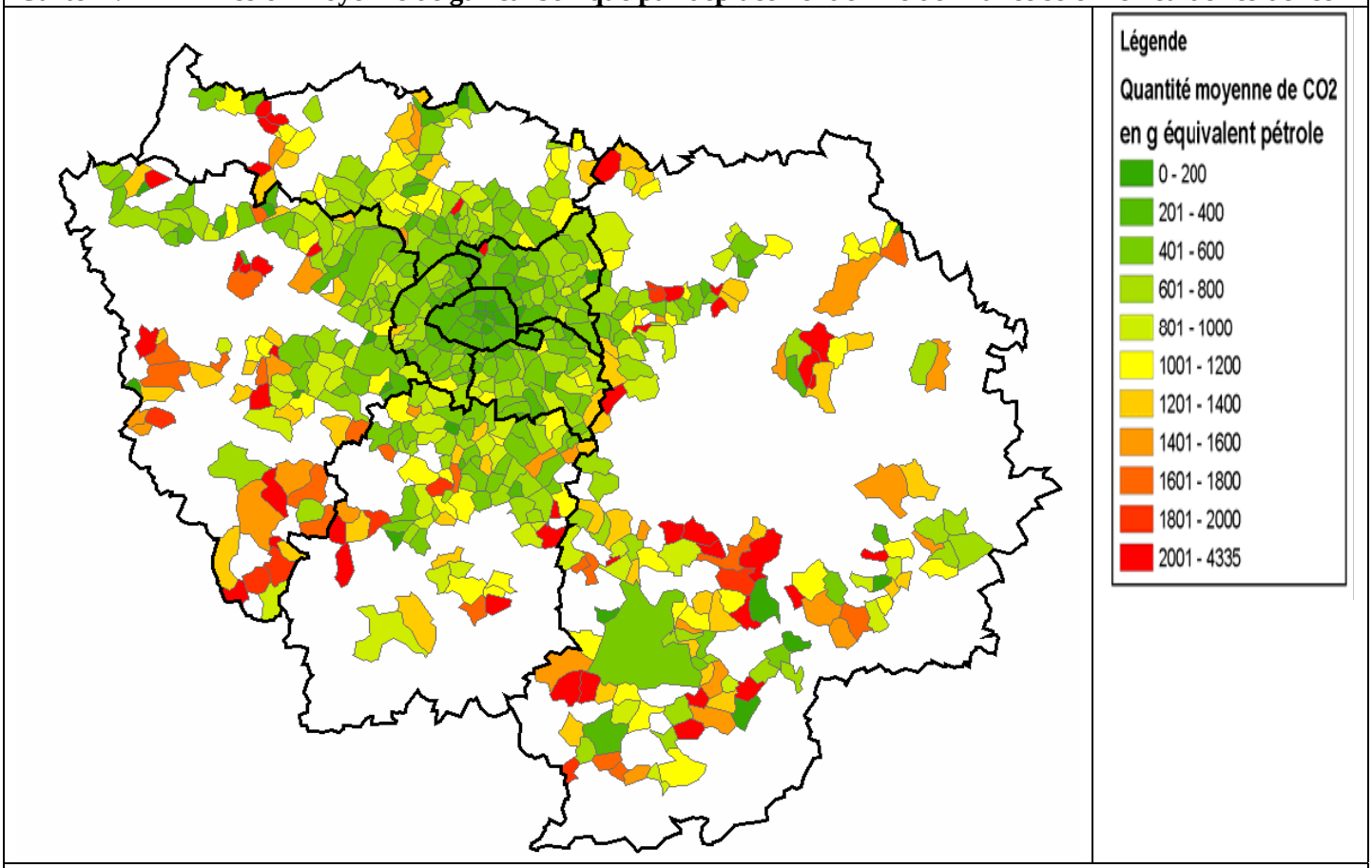
que **sur le plan économique il n'y a pas en soi de densité «bonne»**, «correcte», «gérable» ou «acceptable». Aucune des villes dans cet échantillon, représentant ensemble 250 millions de personnes (soit 10% de la population urbaine mondiale en 1990), ne peut être considérée comme ayant une densité « trop forte » ou « trop faible » qui limiterait son développement économique ou la capacité à la gérer.

C - *Le rôle de la distribution spatiale des densités sur les déplacements (Glachant, 2006 ; Fouchier, 1999)*

Les consommations énergétiques et les émissions de C02 engendrées par les déplacements des citadins varient significativement selon leur lieu de résidence au sein de l'agglomération. Etudier les consommations énergétiques dans les transports urbains à partir de moyennes sur l'ensemble de l'agglomération conduit à des approximations sur leurs déterminants et ne permet donc pas de mettre en évidence les leviers politiques pour les réduire.

La carte 1 élaborée par le CERNA (Abu Alkhair, Glachant, 2006) et le CEP de l'Ecole des Mines de Paris décrit la quantité moyenne de gaz carbonique émise par déplacement en Ile de France selon le lieu de résidence de l'individu concerné. Ainsi, un habitant de la Seine et Marne émet en moyenne quatre fois plus de gaz carbonique qu'un parisien lors de ses déplacements.

Carte 1 : Emission moyenne de gaz carbonique par déplacement en Ile de France selon le lieu de résidence



Données : Enquête Générale Transport, 2001 ; absence de données dans les communes en blanc.
Source : Abu Alkhair, Glachant, 2006

Fouchier (Fouchier, 1999) s'est intéressé aux hétérogénéités de densité au sein de l'agglomération parisienne et leurs effets sur les consommations énergétiques liées aux déplacements urbains. Il est très instructif de se pencher sur l'évolution observable des paramètres de mobilité selon la densité urbaine. Fouchier montre ainsi que **la distribution spatiale des densités au sein de l'agglomération est corrélée d'une part avec la répartition modale des déplacements et d'autre part avec les variations de consommations énergétiques par habitant dans les transports selon la zone de résidence.**

Les indicateurs décroissant du centre vers la périphérie :

- part modale des transports collectifs : de 47% dans Paris, elle décline jusqu'à 10% en périphérie lointaine ; ou de 65% à 15% en répartition des seuls déplacements mécanisés. Dans le cas de l'Ile de France, plus de 80% des prestations de trafic collectif (passagers x kilomètres) sont réalisés par les modes ferroviaires. La concentration de l'offre et des services ferroviaires dans le centre et les banlieues intérieures assure la compétitivité du transport public dans ces territoires ;
- part modale des transports non-motorisés : de 29% à Paris, elle décroît légèrement à 23% en périphérie éloignée. Toutefois la part des déplacements non-motorisés pour aller au travail ou à l'école varie fortement avec la densité urbaine : de l'ordre de 20 à 25% dans les zones très denses, elle n'est que de 5% dans les zones à faible densité ;
- coût du stationnement : en zones denses, le stationnement est rationné et coûteux, alors qu'il est libre et pléthorique en zones à faible densité ;
- budget logement : ce budget est difficile à cerner en raison de variations locales marquées, de secteurs de marché différenciés (location dans le secteur privé ou public, propriété). Une étude de 1999 avance, avec prudence, que le coût mensuel moyen du loyer par ménage varie d'environ 800 euros au centre à 450 euros en périphérie.

Les indicateurs constants :

- budget temps de déplacement (somme journalière des durées de déplacements par personne) est stable avec une moyenne de 82 minutes quelle que soit la localisation en Ile de France ;
- taux moyen de déplacements journaliers par personne : cette constance est perceptible dans le temps (stabilité au cours des 10 à 15 dernières années) et dans l'espace : hormis à Paris où ce taux est de 3,6 dépl/J/personne, il est proche de 3,4 dépl/J/pers quel que soit l'éloignement.

Les indicateurs croissants du centre vers la périphérie :

- part modale des transports individuels : elle passe de 24% dans Paris à 65% en périphérie ; ou de 35 à 85% lorsque seuls les déplacements mécanisés sont comptés. Ces valeurs sont semblables aux valeurs globales des métropoles à fortes et à faibles densités illustrées dans le tableau 3 ;
- taux de motorisation croît dans un rapport de 1 au centre (270 voitures/1000 habitants) à 1,6 en périphérie (> 450 voitures/1000 habitants). L'usage (km/an/voiture) est également croissant ;
- densité de stationnement (nombre total de places publiques et privées par hectare) ; cette croissance de l'offre de stationnement se fait proportionnellement à la part modale par transport individuel motorisé ;
- budget distance : de 12 km par jour, la distance journalière moyenne parcourue par personne dans Paris passe à plus de 30 km en périphérie éloignée, soit un rapport de 2,5 ;
- vitesse moyenne de déplacement : tous modes de déplacements confondus, la vitesse moyenne de déplacement croît dans un rapport de 1 à 3 entre le centre (environ 8 km / h) et la périphérie (25 km / h). Les gains de vitesse en périphérie sont le fait des grandes infrastructures autoroutières et ferroviaires ;
- budget transport : les coûts mensuels moyens de transport privé et collectif varient de 160 euros/mois dans le centre à 480 euros/mois ; soit un rapport de 1 à 3 ;
- consommation d'énergie dans les transports : pour l'ensemble des déplacements, elle est 4 à 5 fois plus faible dans les déplacements ayant pour origine le centre que ceux partant de la périphérie en raison d'une structure modale où plus de 75% des déplacements s'effectuent en transports collectifs ou sont non motorisés.

Ces indicateurs sont étroitement imbriqués : la faible densité est associée à un taux de motorisation et une part modale voiture élevés, cela dans un contexte de stationnement abondant et gratuit. Au contraire, dans un contexte de forte densité urbaine et de stationnement rationné et très coûteux, les transports publics et les modes non-motorisés assurent la majeure partie de la mobilité. Compte tenu du budget temps constant, les plus longues distances de parcours en voiture et transport public sont associés à des vitesses de déplacement nettement plus élevées que dans les zones urbaines denses. L'agglomération parisienne vérifie en cela le paradigme de Zahavi (Zahavi, 1980 ; cf encadré 3). L'allongement général des distances de déplacements se répercute sur le budget-transport lui-même lié à la consommation d'énergie dans les transports.

Encadré 3 : la conjecture de Zahavi (Zahavi, 1980)

Zahavi (Zahavi, 1980) observe sur un échantillon de villes mondiales une double constance budgétaire et temporelle dans la mobilité des urbains. D'une part la moyenne par agglomération des temps quotidiens de transport par habitant est d'une durée invariable d'une heure. D'autre part les citadins consacrent à leurs déplacements en moyenne 11% de leur budget monétaire.

Ainsi le budget temps quotidien consacré au transport reste constant en dépit de l'évolution des vitesses de déplacement.

Zahavi estime alors que si un système de transport plus rapide et meilleur marché est mis en place, les citadins vont l'utiliser pour se déplacer plus et plus loin, et non pour économiser du temps ou de l'argent. Cela traduit le fait que l'usager préfère développer l'univers de ses choix dès que les infrastructures de transport le lui permettent plutôt que de réduire le coût généralisé de déplacements.

La vitesse des modes de transports définit alors l'aire de déplacement des individus. La marche à pied permet de se déplacer à 5 km/h, et donc d'effectuer un trajet de 2,5 km aller-retour en une heure. Ce mode de déplacement offre la possibilité de se déplacer dans une aire de 20 km^2 (un cercle de 2,5 km de rayon). En voiture, avec une vitesse moyenne 10 fois plus élevée que celle de la marche à pied, on peut circuler dans une aire 100 fois plus importante, soit 2000 km^2.

En retenant la conjecture de Zahavi, on constate donc que l'adoption de modes de transport plus rapides transforme fortement la physionomie des villes. L'augmentation de la vitesse moyenne du système de transport d'une ville entraîne un allongement des déplacements. Celui-ci se traduit par un étalement urbain et une diminution des densités.

Ainsi des densités fortes ont des effets positifs sur la soutenabilité des transports urbains : diminution des distances et augmentation de la rentabilité des transports publics, plus économes en énergie. Pour des ménages ayant un même niveau social, Fouchier (Fouchier, 1997) remarque la tendance qu'ont les ménages habitant dans les zones à densité faible des périphéries des grandes mégapoles à se déplacer plus longuement, plus rapidement et plus fréquemment en voiture que les ménages de zones à forte densité.

La différence de consommation énergétique de transport entre des ménages des zones à faible densité et ceux habitant les zones à forte densité est davantage expliquée par les distances faites en voiture que par le nombre des voyages effectués ; ce qui met en avant l'influence de la séparation physique des activités urbaines comme facteur déterminant.

Cependant les distances n'augmentent pas forcément avec un urbanisme de moindre densité du fait de la décentralisation des activités engendrée. On perçoit même qu'au-delà d'une certaine densité, la proximité peut être compensée par des problèmes de congestion responsables d'augmentations de la consommation énergétique qui peuvent être importantes.

Une étude de Golob et Brownstone (Golob, Brownstone, 2005) sur les conséquences de l'hétérogénéité des densités sur les distances parcourues et les consommations énergétiques dans les villes américaines fait écho à ces observations sur l'Ile de France. Golob et Brownstone montrent que, toutes choses égales par ailleurs, un ménage vivant dans une aire urbaine d'une densité résidentielle inférieure à 385 unités d'habitation par kilomètre carré parcourt 1.884 kilomètres et consomme 245 litres de combustible en plus par an. Les auteurs décomposent cet effet de la densité résidentielle sur la mobilité et les consommations énergétiques liées en deux influences : la plus grande mobilité est responsable de 169 litres supplémentaires par an, le choix de véhicules plus énergétivores de 76 litres.

Ces travaux mettent en avant quatre ensembles de facteurs agissant sur les consommations énergétiques et émissions de CO_2 engendrées par les transports urbains :

- Les facteurs « urbanisme » déterminant le besoin de se déplacer : la densité et la mixité fonctionnelle des établissements humains déterminent les distances entre les origines et les destinations des déplacements ;
- Les facteurs « offre de transport » répondant à ce besoin de se déplacer et atténuant les effets de la distance au prix d'un certain coût : l'offre de transport en commun ; l'offre d'infrastructures routières ; le coût et la quantité des stationnements dans les différentes zones de l'agglomération qui influencent significativement le choix modal pour le déplacement ; les vitesses relatives des différents modes de transport ;
- Les facteurs « mobilité » (cf encadré 1) représentant la propension des habitants à se déplacer pour accéder à des biens, des services que la structure géographique urbaine ne leur permet pas de trouver sur place ; le type et le taux de motorisation de la population citadine ;
- Les facteurs « encombrement » constituent une gêne à la mobilité et, augmentant au contraire l'effet de distance, diminuent l'efficacité des moyens de transport.

Comme nous l'avons vu, ces facteurs sont loin d'être indépendants. S'appuyant sur ces analyses, Asher (Asher, 1998) établit une typologie des déplacements au croisement de ces quatre ensembles de facteurs (encadré, 4). Si cette typologie est schématique et qualitative et donc peu mobilisable dans une analyse économique des déterminants du niveau d'énergie consommée dans les transports urbains, elle met en exergue les relations systémiques entre la distribution spatiale des activités et résidences, et les réseaux alternatifs de transports. Nous retiendrons de ces travaux que **l'analyse des consommations énergétiques dans les transports urbains nécessite de s'interroger sur les corrélations entre la distribution spatiale des fonctions urbaines (résidences, emplois, aménités etc.) et la distribution spatiale des déplacements.** Nous allons pour cela nous intéresser dans la section suivante aux travaux de Bertaud sur la structure urbaine.

Encadré 4 : Typologie des déplacements

Ascher (1998) établit une typologie schématique des déplacements :

- Les déplacements atomisés : ceux qui sont épars car ils joignent des zones à faible densité ou parce qu'ils ont lieu à des horaires atypiques. En urbanisation à faible densité, ces déplacements ne peuvent s'appuyer sur des modes de transports collectifs et doivent inévitablement utiliser des modes très individualisés, essentiellement l'automobile.
- Les déplacements polarisés : ceux qui sont parfaitement concentrés parce qu'ils partent ou arrivent dans une zone à moyenne ou forte densité, constituées soit de centres anciens, soit de nouvelles polarités périphériques telles des centres commerciaux et de loisirs. Selon la structure des réseaux, le transport collectif peut jouer un rôle pour l'accès aux centres anciens si ces derniers ont une politique équilibrée de maîtrise de l'automobile et du stationnement. En revanche, les transports individuels motorisés sont plus performants pour l'accès aux nouveaux pôles conçus pour l'automobile avec du stationnement à profusion et gratuit.
- Les déplacements haute fréquence : ceux qui relient des zones denses. Ils forment l'essentiel du marché des transports autres que l'automobile.

D - *Le rôle de la structure urbaine dans la détermination du mode de transport urbain dominant (Bertaud, 2001 ; 2003 ; 2004)*

L'approche des dynamiques urbaines proposée par Bertaud éclaire le rôle des configurations urbaines dans les déplacements, et complète donc utilement les approches présentées précédemment. Pour cet auteur, la façon dont sont spatialement distribuées les densités de population et d'emploi, et les déplacements au sein de l'aire urbaine sont bien plus importants que la densité moyenne pour

expliquer le nombre, la longueur, les modes empruntés et donc les consommations énergétiques des déplacements.

Bertaud définit la « structure spatiale » urbaine par deux éléments complémentaires (Bertaud, 2001) : 1) la distribution spatiale de la population 2) la distribution spatiale des déplacements (« pattern trips ») effectués par les personnes quand elles vont de leur domicile vers les lieux où elles vont avoir une activité productive ou sociale (lieux de travail, magasins, écoles, …).

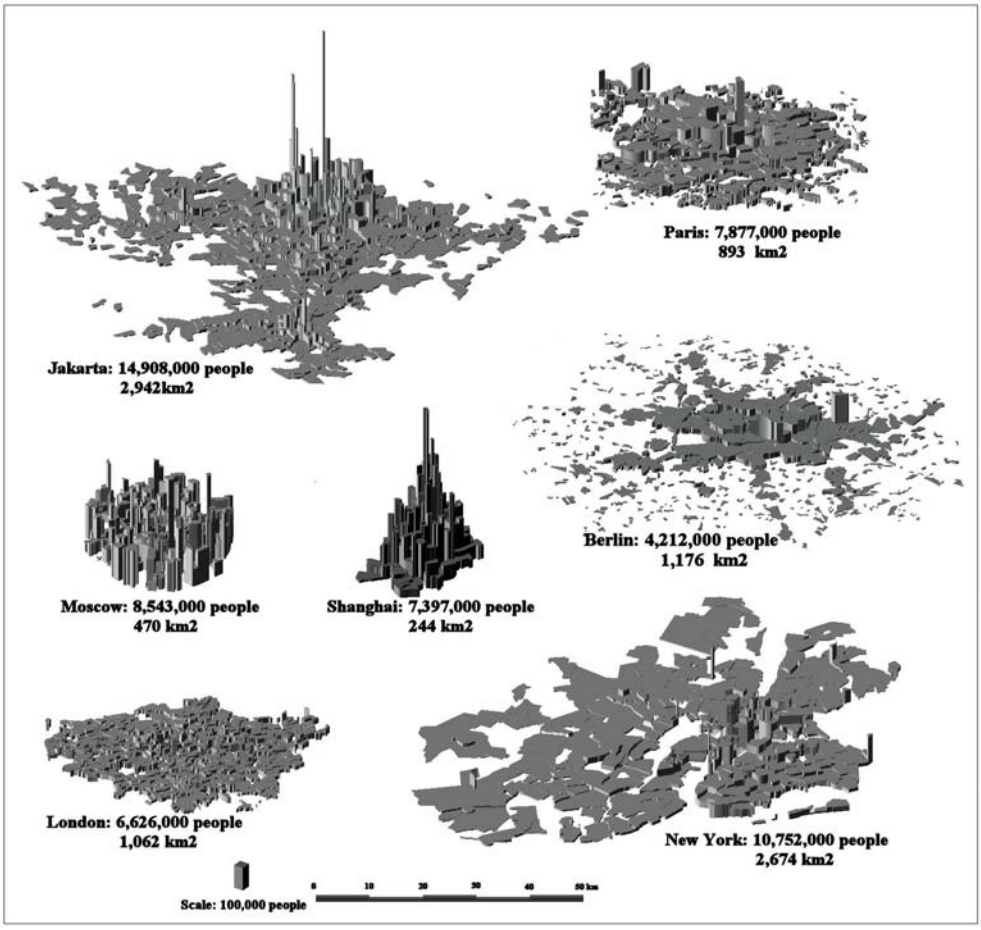
Pour cet auteur, **la structure spatiale urbaine est essentiellement forgée par les forces du marché en interaction avec l'environnement réglementaire, les investissements dans les infrastructures et la fiscalité.**

Bertaud développe des outils d'analyse – que nous présentons – permettant d'étudier ces structures urbaines. Il met ainsi en exergue le rôle de la structure urbaine dans l'efficacité des alternatives modales de transport. Pour Bertaud, **le type de structure urbaine sélectionne le mode de transport dominant**.

1) La distribution spatiale de la population

Bertaud (Bertaud, 2001) représente graphiquement la distribution spatiale des populations sous forme d'un objet en 3 dimensions : l'aire urbaine construite est représentée dans le plan XY et découpée en petites zones dont on indique la densité moyenne de population sur l'axe Z.

Graphe 3 : Distribution des densités résidentielles dans quelques villes



Source: Bertaud, 2001.

La distribution spatiale de la population est donc une représentation statique de la ville lorsque les citadins sont chez eux, alors que la distribution spatiale des déplacements décrit les trajectoires que ces mêmes citadins vont suivre durant le temps où ils ne sont pas chez eux.

Les structures spatiales présentées dans la figure ci-dessus apparaissent complexes et très différentes. Pour mieux comprendre l'influence de ces structures spatiales urbaines sur les consommations énergétiques des transports, il faut donc analyser les propriétés géométriques de ces objets en trois dimensions, et non la simple densité moyenne. Parmi ces propriétés, le gradient de densité, c'est-à-dire le sens et la rapidité avec laquelle la densité évolue en allant du centre à la périphérie, est riche d'enseignement sur les effets de la régulation des marchés fonciers et immobilier dans le processus de structuration de l'espace urbain.

2) Le profil de densité

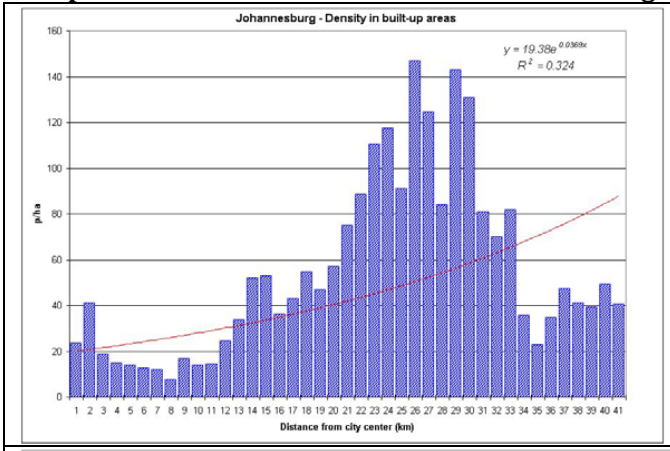
Le profil de densité est une manière simple de représenter la distribution spatiale de la population au sein d'une aire urbaine. Le profil de densité fournit une image de la distribution des densités en fonction de la distance à un point central qui est généralement le centre du « *Central Business District* (CBD) ».

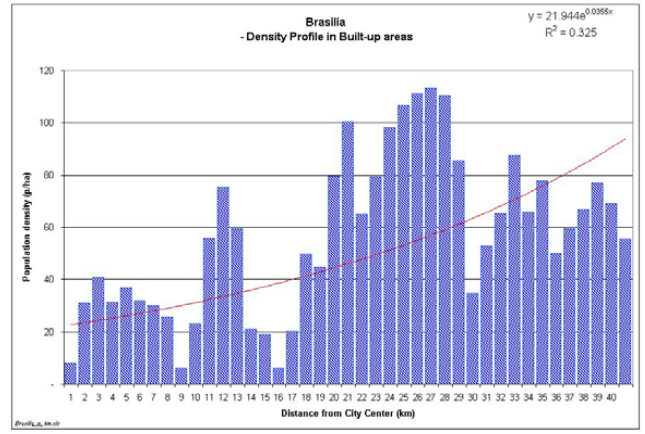
Dans la grande majorité des cas, le profil de densité suit approximativement la courbe exponentielle à pente négative prédite dans le modèle développé par Alonso (Alonso, 1964), Mills (Mills, 1967), Muth (Muth, 1969) et Fujita (Fujita, Ogawa, 1989). Selon la micro-économie urbaine (cf chapitre 5, II.B), le gradient négatif est engendré par la compétition économique entre les différents acteurs urbains pour se localiser au plus près du centre de la ville.

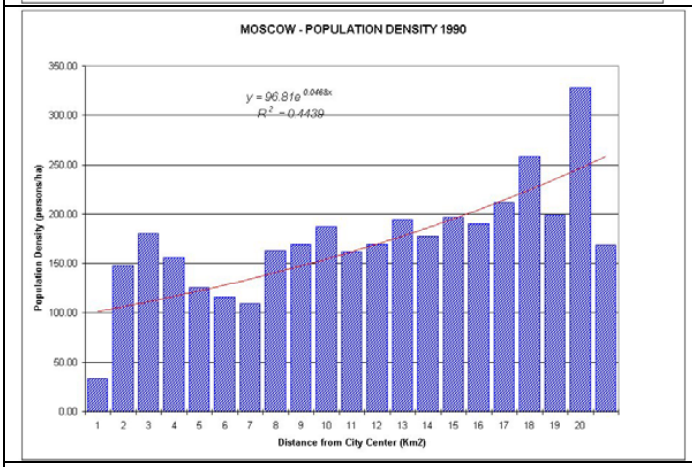
Par comparaison entre des contextes urbains variés, Bertaud montre que ce gradient négatif de densité résulte en effet pour l'essentiel du fonctionnement du marché foncier, toujours partiellement réglementé, mais à des degrés très variables selon les pays. **Le type de régulation de l'usage des sols, la fiscalité, les investissements dans les infrastructures décidés par la puissance publique sont donc déterminants dans le fonctionnement des marchés fonciers et immobiliers, et par là dans les dynamiques de structuration de l'espace urbain et donc dans le profil de densité.**

Selon Bertaud, **les structures spatiales urbaines sont particulièrement résilientes et les dépendances de sentiers sont fortes**. En effet, le profil de densité est si résilient que même les villes avec une interruption historique du marché foncier comme Varsovie et Beijing conservent ce gradient négatif. Pourtant quelques villes comme Brasilia, Moscou et Johannesburg, où la liberté du marché a été interrompue pendant une longue période, présentent des gradients positifs (cf graphe 4). Aussi la structure spatiale d'une ville réduit significativement les développements futurs possibles.

Graphe 4 : Profiles de densités de Johannesburg, Brasilia, Moscou







Source: Bertaud, 2004.

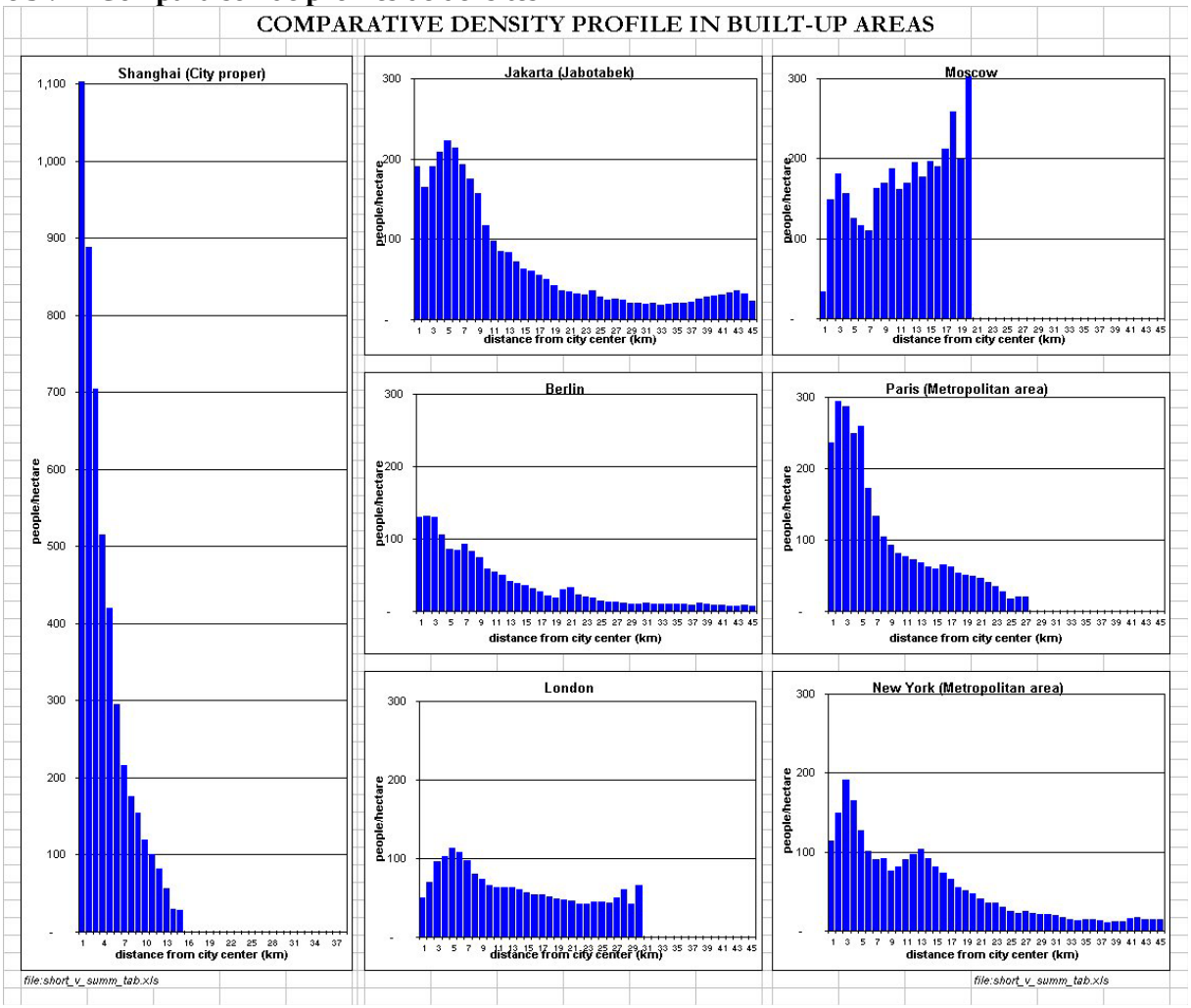
Bertaud estime que, s'il n'est pas possible de définir une structure spatiale optimale puisque les objectifs du développement urbain changent au cours du temps, il est par contre possible d'identifier les formes urbaines pertinentes en regard d'un objectif particulier. Ainsi si, comme nous l'avons démontré précédemment dans la sous-section II.B de ce chapitre, une densité forte ou faible n'est pas nécessairement négative en soi pour le développement économique, **un gradient positif constitue un facteur d'augmentation des consommations énergétiques dans les transports urbains**. En effet, pour une densité moyenne donnée, dans une ville avec un gradient de densité positif, la distance moyenne par personne au CBD sera toujours plus grande que pour une ville équivalente avec un gradient de densité négatif. Aussi est-il raisonnable de penser que les déplacements seront plus longs.

Bien entendu, il est difficile de construire une typologie simple des différents types de politiques urbaines prenant en compte la réglementation de l'usage des sols, les investissements dans les infrastructures et la fiscalité (Bertaud, Malpezzi, 2003). Bertaud et Malpezzi distinguent cependant :

- les villes où l'urbanisation (même si elle est en partie planifiée) est orientée par les forces de marché, comme Paris, Bangkok et la plupart des villes américaines.
- les villes qui sont passées d'une planification stricte à une urbanisation orientée par le marché, comme Varsovie et Sofia.
- les villes qui sont strictement planifiées et où les principes du marché ne sont pas respectés, comme Moscou, Brasilia, Séoul, Johannesburg.

Les observations menées sur 48 mégapoles par Bertaud et Malpezzi (Bertaud, Malpezzi, 2003) montrent que les villes strictement planifiées ont des gradients de densité plus plats, des centres moins denses et un étalement plus important.

Graphe 5 : Comparaison de profiles de densités



Source : Bertaud, 2001

Ces graphes montrent que toutes les villes, à l'exception de Moscou, suivent le même modèle – une courbe exponentielle à pente négative. L'exception de Moscou peut s'expliquer par le fait qu'elle n'a pas eu de marché foncier et immobilier libre depuis 70 ans ; il est donc cohérent qu'elle ait un profil de densité différent des villes orientées par le marché. Mais alors que dire de Shanghai ? Cette ville n'a plus de marché foncier et immobilier depuis les années 1960 et pourtant présente un profil de densité plus aigu que Paris ou New York où le marché a exercé sa pression depuis plusieurs centaines d'années. Pour Bertaud (Bertaud, 2001), la seule explication convaincante est que l'usage de la bicyclette comme principal moyen de transport a forgé ce profil de densité de la même manière que l'aurait fait le marché foncier. De même on peut remarquer qu'à Londres, l'élévation de la densité entre 26 et 30 km du centre correspond à «l'effet green belt» (Bertaud, 2001). Bien que cette ceinture verte soit difficilement détectable aujourd'hui, sa longue présence a provoqué au-delà une densification liée d'une part à la raréfaction des terrains disponibles et d'autre part à l'effet «aménité».

Encadré 5 : Définition des concepts de « structure urbaine », « forme urbaine », « système de transport » et « système d'usage des sols »

Structure urbaine

Bertaud (Bertaud, 2001) définit la « structure spatiale » urbaine par deux éléments complémentaires : 1) la distribution spatiale de la population 2) la distribution spatiale des déplacements (« pattern trips ») effectués par les personnes quand elles vont de leur domicile vers les lieux où elles vont avoir une activité productive ou sociale (lieux de travail, magasins, écoles, …).

Pour cet auteur, la structure spatiale urbaine est essentiellement forgée par les forces du marché en interaction avec l'environnement réglementaire, les investissements dans les infrastructures et la fiscalité.

Forme urbaine
Nous employons le terme de « forme urbaine » pour caractériser, à l'échelle de la ville prise dans sa globalité, la manière dont sont agencés géométriquement les différents composants de l'agglomération.

Système de transport
Nous définissons le système de transport comme l'offre technico-organisationnelle de transport.

Système d'usage des sols
Nous définissons le système d'usage des sols comme la distribution spatiale des différentes fonctions urbaines

3) La distribution spatiale des déplacements

La structure urbaine qui a le plus inspiré les travaux de modélisation économique des dynamiques urbaines est la ville monocentrique dotée d'un « Central Business District (CDB) » vers lequel tous les déplacements convergent. Les travaux pionniers de Alonso (Alonso, 1964), Mills (Mills, 1967) et Muth (Muth, 1969) sur les gradients de densité et de rente foncière dans les aires urbaines sont ainsi basés sur l'hypothèse d'une ville monocentrique. Mais au cours du temps, il est devenu évident que la structure de beaucoup de villes diffère du modèle monocentrique et que les activités génératrices de déplacements sont réparties en agglomérats (« clusters ») dans l'ensemble de l'aire urbaine, en dehors du CBD. Bertaud identifie alors quatre cas de figure pour décrire la distribution spatiale des déplacements d'une ville (Graphe 6).

La ville monocentrique (Graphe 6a). Elle peut maintenir un marché du travail unifié en fournissant la possibilité de se déplacer aisément de la périphérie vers le centre le long des routes radiales ou avec le rail. Plus la distance au CBD est courte, plus la valeur foncière est élevée. Si les marchés fonciers et immobiliers sont libres ou faiblement régulés, les densités tendent à suivre le prix du foncier et le gradient de densité présente donc une pente négative du centre vers la périphérie (par exemple : Londres et New York dans la Graphe 3).

La ville polycentrique, version « villages urbains » (Graphe 6b). Certains urbanistes idéalisent ce genre de villes où une communauté émerge autour d'un centre d'emploi (cluster). Ces «villages urbains» autosuffisants vont s'agréger pour former une ville polycentrique étendue et dont la densité moyenne peut être faible. Malgré cela, dans une telle ville, les déplacements se font sur de très courtes distances. Idéalement tout le monde pourrait se déplacer en vélo ou à pied pour aller travailler[7]. Selon Bertaud, ce phénomène n'a hélas jamais été observé dans aucune ville. Il correspond à une fragmentation extrême du marché du travail. Cette vision de «villages urbains» autosuffisants contredit donc ce qui est pour beaucoup la raison d'être des mégapoles : les économies d'agglomération[8] obtenues par un marché du travail large et intégré.

[7] Cette vision extrême fut exprimée, par exemple, par Cervero (Cervero, 2001).

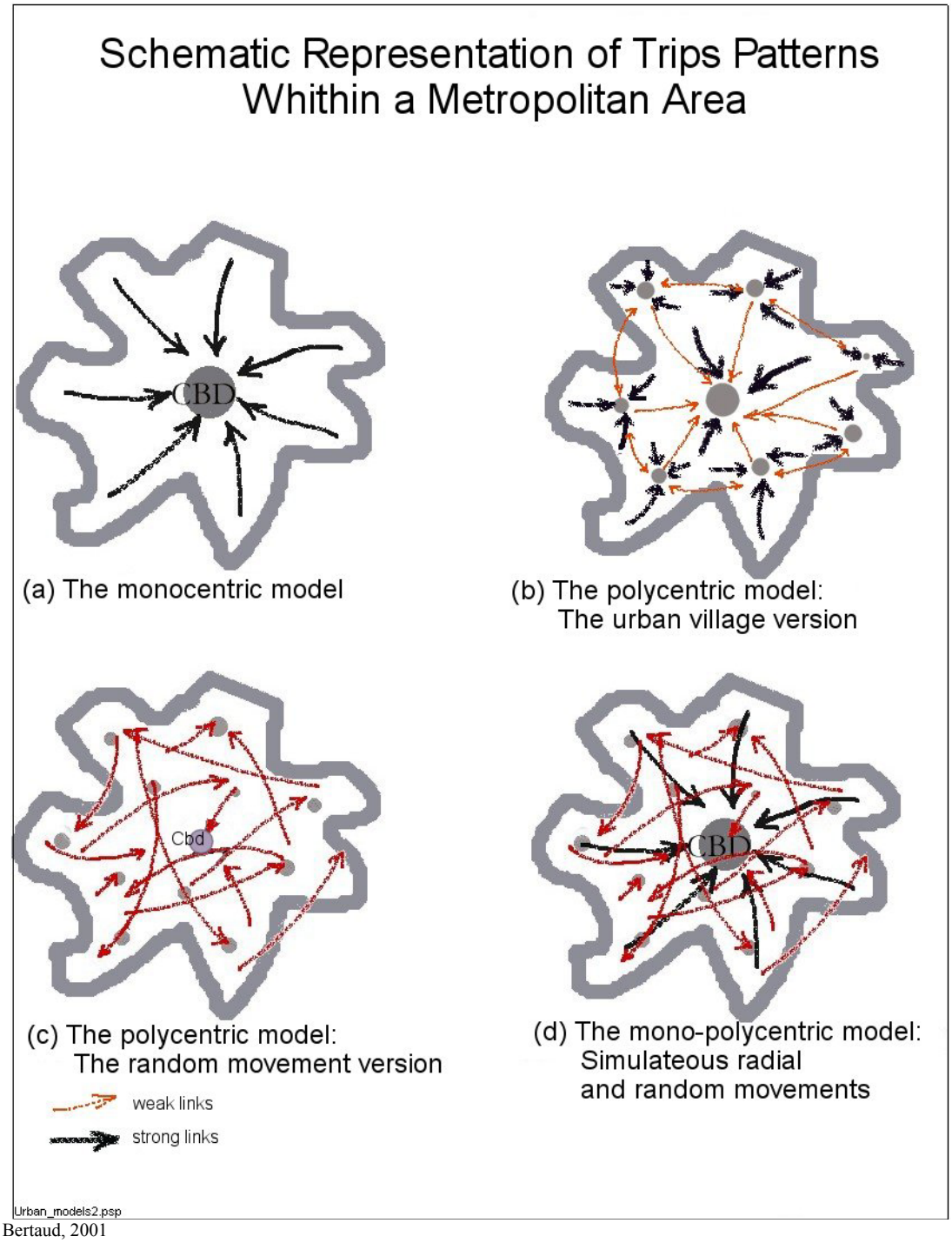
[8] Les économistes identifient trois facteurs pour expliquer l'agglomération d'activités productives en un même lieu, la ville : les économies d'échelle, qui sont internes à l'entreprise ; les économies de localisation, qui sont externes à l'entreprise, mais internes au secteur industriel concerné ; les économies d'urbanisation, qui sont externes à l'entreprise et au secteur industriel, et qui découlent de la présence d'infrastructures publiques et d'une interaction forte entre des activités multiples. Ces trois facteurs sont regroupés sous le terme d'économies d'agglomération (Camagni, 1996).

Pourtant cette utopie persiste dans l'esprit de nombre d'urbanistes. Stockholm, Séoul, Shanghai depuis 20 ans en fournissent des exemples intéressants : alors que les constructions de logement sont directement liées dans les villes satellites à l'existence d'emplois locaux, on constate que la majorité des habitants des ces villes satellites commutent pour travailler en ville et que les emplois des villes satellites sont occupés par des habitants du centre. Cela donne le troisième type de ville : la ville polycentrique avec déplacements quasi « browniens » (Graphe 6c).

Le quatrième type, la ville mono-polycentrique (Graphe 6d), résulte de l'évolution des grandes villes initialement monocentriques. Bertaud considère que lorsque les villes croissent en taille, leur structure monocentrique originelle se dissout progressivement en une structure polycentrique. Le CBD perd sa primauté, et des clusters d'activités générant des déplacements se répartissent dans l'aire urbaine bâtie. Les mégapoles ne sont pas nées polycentriques, elles ont évolué dans cette direction (Cf. Jakarta, Graphe 3, où le polycentrisme naissant est bien visible). Certaines circonstances tendent à accélérer la mutation vers la polycentricité : un centre historique avec un faible niveau d'aménités, un taux de motorisation élevé, un bas prix de la terre, une topographie plate, un réseau viaire en grille. D'autres tendent à freiner cette mutation : un centre historique avec un haut niveau d'aménité, un transport public basé sur le rail, un réseau viaire originellement radial, et une topographie rendant difficile la communication entre banlieues.

Dans une ville polycentrique, chaque centre secondaire génère des déplacements depuis l'ensemble de l'aire urbaine. Ces déplacements montrent une grande dispersion des origines et destinations, presque aléatoire. Ils tendent donc à être plus longs que dans une ville monocentrique, toutes choses égales par ailleurs. Bertaud considère que l'on peut aussi s'attendre à ce que les villes polycentriques aient un gradient de densité avec une pente négative centré sur le « centre de gravité » de l'aire urbaine, qui peut être différent du CBD. Mais la pente doit être plus faible que pour une ville monocentrique, étant donné que la proximité au centre de gravité offre des avantages en terme d'accessibilité moins importants que dans le cas d'une ville monocentrique. Ces hypothèses sont vérifiées dans des villes comme Los Angeles ou Atlanta.

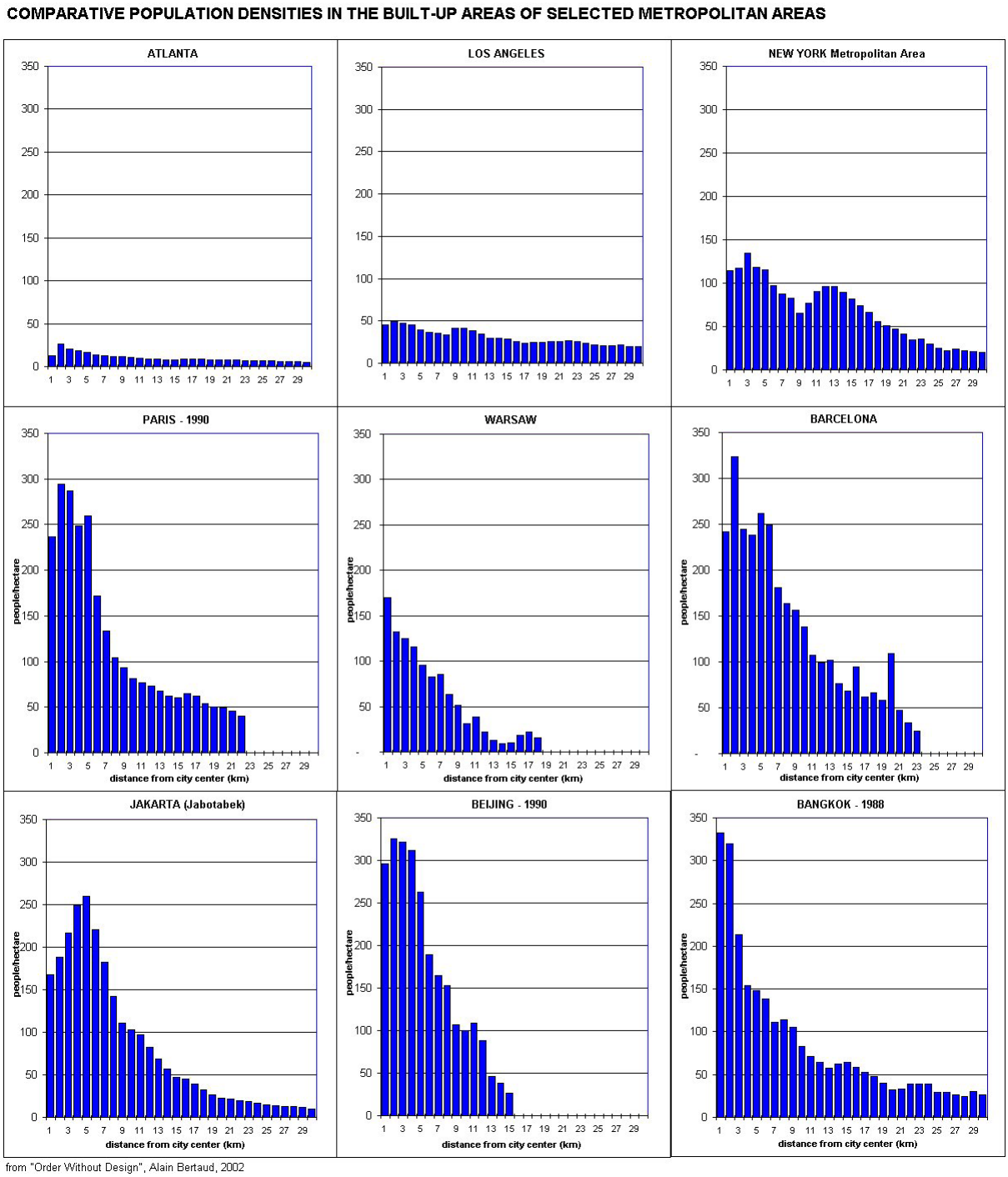
Graphe 6 : Typologie des déplacements urbains selon Bertaud



Source: Bertaud, 2001

Pour Bertaud (Bertaud, 2004), la grande différence en terme de densité autour du CBD entre les villes américaines, asiatiques et européennes peut être rapprochée des différentes distributions spatiales des déplacements. Les villes à dominante monocentrique, comme Paris, Varsovie, Barcelone, Jakarta, Beijing ou Bangkok tendent à avoir des densités plus importantes à proximité du CBD que les villes à dominante polycentrique, comme Atlanta, Los Angeles ou New York. Les 6 villes non américaines présentées dans le graphe 7 ont dans les 4 Km autour du CBD des densités comprises entre 170 et 320 personnes par hectare (p/ha), comparées aux 20 pers/ha à Atlanta et 120 pers/ha à New York.

Graphe 7 : Comparaison de profile de densité



Source: Bertaud, 2002

4) Les liens entre structure urbaine et efficacité des différents modes de transports : la compatibilité des structures urbaines avec des objectifs environnementaux.

Pour Bertaud **le type de structure urbaine détermine le mode de transport le plus performant**. En effet, la structure spatiale urbaine définie par le degré de monocentricité et la distribution spatiale des densités a un effet direct sur le nombre et la longueur des déplacements, sur

l'espace offert aux différents modes de transport, et donc sur la possibilité pour les transports en commun ou la voiture d'être le mode de transport dominant.

a) Structure urbaine et longueur des déplacements

Dans une ville à dominante monocentrique, les déplacements sont généralement plus courts puisqu'ils sont majoritairement effectués de la périphérie vers le CBD et que, dans la plupart des villes monocentriques, le CBD coïncide avec le centre de gravité de la population, comme c'est le cas à New York, Londres, Paris, Moscou et Shanghai. Dans ce cas plus la proportion des déplacements dirigés vers le CBD est grande, plus les déplacements vont être courts puisque par définition le centre de gravité est le point depuis lequel la somme des distances pondérées par la population est la plus courte.

Pour analyser les effets de la structure urbaine – distribution spatiale des densités de population et distribution spatiale des déplacements - sur la longueur des déplacements, Bertaud (Bertaud, 2001) propose une étude théorique de différents arrangements spatiaux d'une ville imaginaire où la population (1 million d'habitants) et la superficie urbanisée (100 kilomètres carrés) - et donc la densité moyenne de la ville (100 personnes par hectare) - restent constantes. Seule la structure spatiale varie.

Bertaud calcule la distance moyenne par personne. Les variations de distance moyenne des déplacements sont calculées pour 20 distributions spatiales des populations et selon deux distributions spatiales des déplacements (patterns trips) : 1) les déplacements sont monocentriques et convergent vers le Centre de Gravité ; Bertaud mesure alors la distance moyenne par personne au Centre de Gravité (ADC[9]) ; 2) les déplacements sont polycentriques, les origines et destinations des déplacements sont aléatoires ; Bertaud mesure alors la distance moyenne par personne entre des points aléatoires (ADR[10]).

Bertaud suppose qu'il n'y a qu'un seul CBD et qu'il coïncide avec le centre de gravité (CG) de chaque structure spatiale étudiée[11].

Les variables sont la densité de population de chaque sous-zone et la distribution spatiale des différentes sous-zones engendrant des formes urbaines variées.

Les structures spatiales modélisées sont présentées dans le graphe 8 ; elles sont classées par distance moyenne au Centre de Gravité (ADC) croissante : la structure urbaine 1 présente une ADC de 3 km ; la structure urbaine 20 présente une ADC de 6 km.

Encadré 6 : Central Business District (CBD), centre de gravité, indice de dispersion et indice d'excentricité

Central Business District (CBD) (Géoconfluences)
Le Central Business District (CBD) correspond en français au Centre des Affaires. Il résulte de l'élimination progressive du centre-ville (« *downtown* ») de fonctions résidentielles, des activités industrielles et de certaines formes de commerce pour former un espace où se concentrent des activités à très forte valeur ajoutée financière (sièges sociaux, sociétés spécialisées dans les transactions, etc.) et les services de proximité (commerces, restauration) qui leur sont attachés. La recherche de la centralité, les prix très élevés du foncier ont conduit urbanistes et architectes à concevoir des immeubles très élevés dont la surface de plancher rapportée au sol est très importante : les mouvements verticaux remplacent alors les déplacements horizontaux. D'où des paysages urbains dont le profil (la « *skyline »)* est caractéristique.

[9] ADC : Average Distance per person to Center of gravity (= CBD).

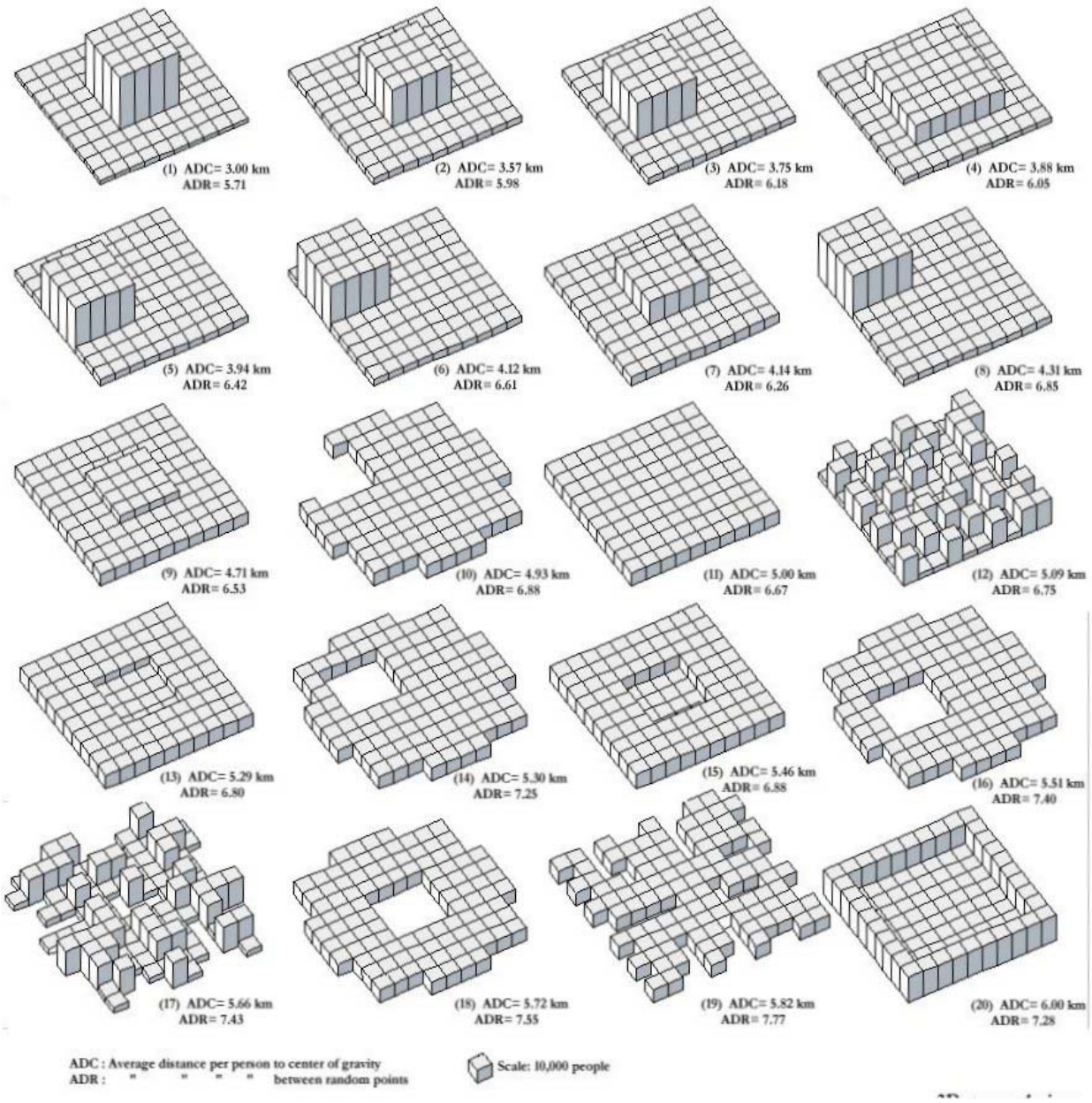
[10] ADR : Average Distance per person between Random point.

[11] L'indice d'excentricité est donc nul.

Centre de gravité
Le centre de gravité de la population est défini comme le point d'où la distance moyenne vers tous les autres points de la ville est la plus courte.

Indice d'excentricité
Le CBD d'une ville est considéré excentrique s'il ne coïncide pas avec le centre de gravité de la population. L'indice d'excentricité, proposé par Bertaud et Malpezzi (2003), est mesuré en calculant le ratio de la distance entre le CBD et le centre de gravité de la population sur la distance moyenne par personne au CBD. Plus cet indice est grand, plus le CBD est excentrique.

Graphe 8 : 20 structures spatiales urbaines stylisées



Source : Bertaud, 2001

Les résultats permettent de tirer trois conclusions majeures :

1) Les performances des différentes distributions spatiales des densités varient considérablement : la distance moyenne des personnes au Centre de gravité (coïncidant avec le CBD) (ADC) double, passant de 3 à 6 km, entre la première configuration spatiale (distribution 1) et la dernière (distribution 20) alors que la superficie urbanisée totale reste elle-même inscrite dans un carré de 12 km de coté. Ainsi entre des villes de densité moyenne identique, la distribution spatiale des densités est un facteur essentiel déterminant la longueur des déplacements.
2) Parmi les différentes distributions spatiales des densités, la variation de la distance moyenne au Centre de Gravité (ADC) est plus importante que celle de l'écart entre la distance moyenne au Centre de Gravité (ADC) et la distance entre des origines et destinations aléatoires (ADR) pour une configuration urbaine donnée. Ainsi la distribution spatiale des densités elle-même a plus de conséquences sur la longueur des déplacements que le fait que la ville soit monocentrique ou polycentrique.
3) Si une distribution spatiale des densités produisant une distance moyenne au Centre de Gravité (ADC) importante engendre généralement aussi une distance moyenne importante des déplacements aléatoires (ADR), la correspondance n'est pas linéaire. Ainsi certaines distributions spatiales des densités réduisant la distance moyenne pour des mouvements monocentriques (ADC) augmentent la distance moyenne pour des mouvements aléatoires (ADR). Par exemple la configuration urbaine classée treizième pour la distance moyenne au Centre de Gravité (ADC = 5,29 km) engendre une distance moyenne pour des mouvements aléatoires (ADR = 6,80 km) supérieure à la configuration urbaine classée huitième (ADC = 4,31 km ; ADR = 6,85 km).

Nous retenons de cette étude théorique menée par Bertaud (2001) que

- au-delà de la densité moyenne, **la structure urbaine détermine la longueur des déplacements** ;

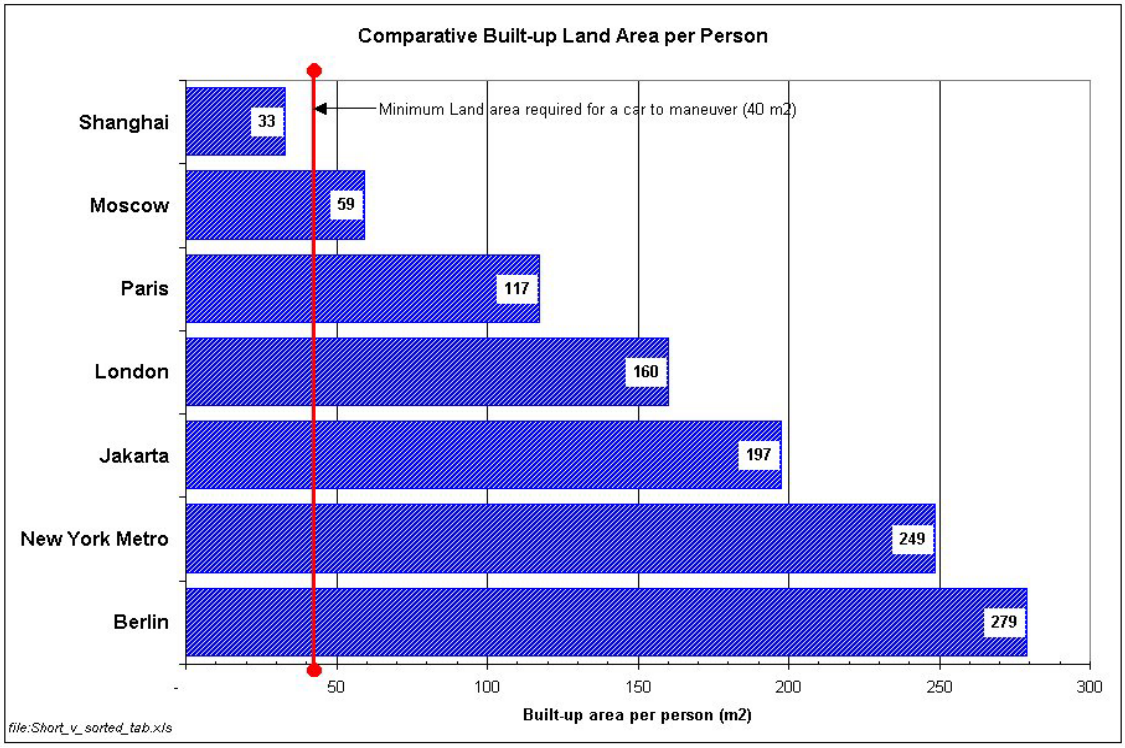
- parmi les deux éléments complémentaires définissant la structure urbaine, **la distribution spatiale des densités est le facteur prépondérant dans la détermination de la longueur des déplacements**, elle influence de manière plus significative les distances moyennes parcourues que le fait que la ville soit monocentrique ou polycentrique

- il n'y a pas de distribution spatiale des densités optimale dans l'absolu ; ce n'est qu'au regard de la distribution spatiale des déplacements qu'elle peut être évaluée.

b) Compatibilité de la voiture avec de fortes densités : la disponibilité moyenne d'espace par habitant

La densité étant mesurée à l'intérieur des limites administratives et donc englobant des espaces vacants et des étendues d'eau, Bertaud estime qu'il est plus utile et significatif de diviser la population urbaine par l'espace urbanisé. L'espace urbanisé est alors défini comme l'espace bâti consommé par les activités urbaines ; les espaces libres de plus de 4 hectares, les terres agricoles, aquatiques et forestières, ainsi que les aéroports, les routes et les autoroutes non-adjacentes à une terre urbanisée ne sont pas inclus.

Graphe 9 : Comparaison de disponibilité moyenne d'espace par habitant



Source : Bertaud, 2001

Selon Bertaud, il n'y a pas de bon ni de mauvais chiffre de disponibilité d'espace par habitant. Il n'y a que des compromis entre des caractéristiques spatiales et, par exemple, des options de transport. La ligne rouge représente la quantité de terrain nécessaire pour manœuvrer et garer une voiture (40 m2). La voiture en ville entre en compétition non seulement avec les mouvements des piétons et des autres moyens de transport, mais aussi avec les commerces, les habitations et les différentes aménités urbaines. Il y a donc un seuil de densité au-delà duquel la voiture pose d'énormes difficultés. Ainsi on remarque que la surface nécessaire pour une voiture est une faible fraction de l'espace disponible par citadin à Berlin et New York, une portion significative dans des villes comme Moscou et excède l'espace disponible par personne à Shanghai. L'implication de ceci est particulièrement claire : plus la disponibilité d'espace par citadin est faible, plus l'utilisation de la voiture comme moyen de transport est perturbateur.

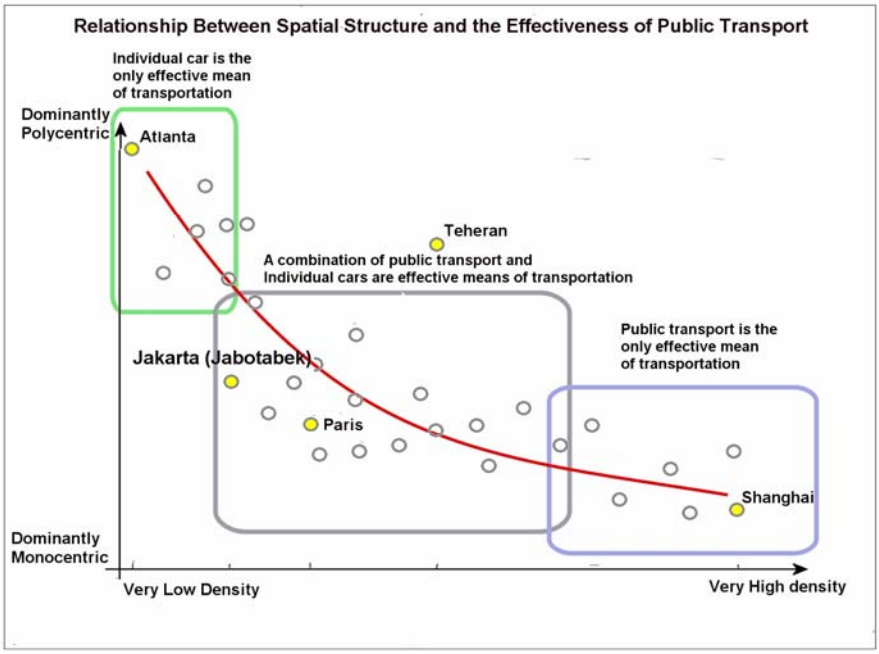
c) Compatibilité des transports en commun avec différentes structures urbaines

Les transports en commun sont incompatibles avec des densités faibles et des structures urbaines à dominantes polycentriques. Les stations de bus et de rail doivent être facilement accessibles depuis les lieux de résidence et de travail et la vitesse de marche à pied est au plus de 5 km/heure. Le temps de marche acceptable varie en fonction des cultures et des revenus mais différentes enquêtes montrent que les citadins cherchent à éviter d'avoir à marcher plus de 10 minutes. Aussi les stations de transports en commun ont un rayon de chalandise (« catchment area ») de 800 mètres, soit 200 ha « à vol d'oiseau ». Cette aire de chalandise peut toutefois être élargie par des systèmes d'alimentation, généralement par mini bus ou taxi collectif. Cette solution pose les problèmes classiques d'intermodalité : perte de temps, augmentation du coût direct en l'absence d'intégration tarifaire, besoin d'infrastructures de commutation adaptées et donc renchérissement des investissements nécessaires.

Quoiqu'il en soit, l'investissement dans une infrastructure de transport en commun n'est économiquement justifié que si les densités de résidence et d'emplois sont suffisantes dans le rayon d'action des stations. Si bien qu'un consensus émerge entre les chercheurs et les planificateurs urbains sur un seuil de pertinence pour les transports en commun autour d'une densité de 30 habitants /ha.

Bertaud (Bertaud, 2003) en conclut **qu'il existe, à la croisée des densités et du degré de mono/polycentricité, des domaines d'efficacité pour les différents modes de transport** (Graphe 10).

Graphe 10 : Relation entre la structure spatiale et l'efficacité des moyens de transport urbains



Source: Bertaud, Malpezzi, 2003

La comparaison entre Atlanta (6 hab/ha) et Barcelone (171 hab/ha) illustre d'une manière plus concrète les problèmes émergents avec des densités faibles. Le réseau de métro barcelonais a une longueur de 99 km et 60% des citadins vivent à moins de 600 mètres d'une station de métro. Le réseau de métro d'Atlanta est long de 74 km mais seulement 4% des citadins vivent à une distance inférieure à 800 mètres d'une station de métro. Ainsi à Atlanta seulement 4,5% des déplacements totaux sont effectués en métro alors qu'à Barcelone cette proportion atteint 30%. Si Atlanta voulait offrir la même accessibilité au métro à ses citadins que Barcelone, il faudrait construire 3400 km de lignes de métro supplémentaires et 2800 nouvelles stations. Cet énorme investissement permettrait potentiellement à Atlanta de transporter le même nombre de personne que Barcelone avec seulement 99 km de ligne et 136 stations.

Dans le cas d'Atlanta la très faible densité exclut le transport en commun comme une alternative viable à la dépendance automobile. Encourager la densification n'est pas faisable non plus. Pour atteindre le seuil de 30 hab/ha en 20 ans, en supposant que la population continue de croître à un taux de 2,7% par an, l'aire urbaine devrait se réduire de 67%. En d'autres termes, 67% du stock foncier existant doit être détruit, la terre doit retourner à la nature, les ménages et les emplois doivent se relocaliser sur les 33% restant de l'aire urbaine. L'exemple d'Atlanta montre bien comment la structure spatiale existante contraint le nombre d'alternatives dans les stratégies de développement urbain possibles. Cet exemple illustre les fortes dépendances de sentier que connaît le développement urbain.

Si l'approche développée par Bertaud est particulièrement éclairante sur le rôle de la structure urbaine dans la mobilité des citadins et donc les consommations énergétiques et émissions de CO_2 liées aux transports urbains, les critiques qui peuvent être faites portent sur deux points.

Premièrement, conservant le cadre néo-classique de l'économie urbaine, son approche reste dépendante d'un point central, le CBD ou le centre de gravité de la distribution spatiale des densités.

Elle ne permet pas de prendre en compte la complexité de localisations définies par rapport à plusieurs points, ni l'existence de caractéristiques propres à chaque lieu.

Deuxièmement, Bertaud ne prend pas explicitement en compte les effets des technologies de transports sur les localisations urbaines et sur l'accessibilité différentielle qu'elles offrent, et donc leurs interactions structurantes avec la distribution spatiale des acteurs urbains. Il renonce à aborder la complexité systémique des relations entre le système de transport et le système d'usage des sols, ce que nous nommerons le couple «transport – usages des sols». Il renonce à endogénéiser la compétition pour la localisation spatiale en fonction de l'accessibilité et les interactions spatiales engendrant la demande de mobilité.

III - Les technologies de transport successivement dominantes déterminent l'évolution de la structure urbaine et donc les consommations énergétiques des transports urbains (Schaeffer, 1975 ; Barter, 1999)

Considérant la relation entre le système de transport et la structure urbaine par l'autre bout de la lorgnette, des auteurs estiment que la façon dont sera gérée la saturation de l'offre d'infrastructure de transport va définir les formes urbaines. Cette approche, inverse de celle que nous avons présentée dans la section précédente, s'appuie notamment sur la double constante de Zahavi (Zahavi, 1980 ; cf encadré 3) mettant en avant l'importance fondamentale de la vitesse des modes de transports dans le fonctionnement spatial de la ville et sur les travaux de Newman et Kenworthy (Newman, Kenworthy, 1999) soulignant la corrélation entre les densités urbaines moyennes et la répartition modale des déplacements. **L'effet structurant des infrastructures de transport est alors mis en avant dans l'évolution de l'organisation spatiale des villes.**

Une typologie des formes urbaines proposée par Schaeffer (Schaeffer, 1975) (reprise par Newman, Kenworthy (1995) et Barter (1999)) reprend cette **approche basée sur les révolutions technologiques successives et donc sur l'évolution des modes de transport dominants**. Schaeffer distingue la ville piétonne (« *the walking city* »), la ville du transport en commun (« *the public transport city* » ou « *transit city* ») et la ville automobile (« *the automobile city* »). Dans cette typologie construite pour les villes du Nord, les trois types apparaîtraient successivement alors que le mode de transport dominant passe de la marche à pied au transport public puis à l'automobile. Ce cadre d'analyse n'exclut pas des formes hybrides : les villes européennes ont souvent un centre piétonnier, une première couronne desservie par les transport public et une seconde couronne répondant aux besoins de l'automobile. Barter (Barter, 1999) dont l'étude est centrée sur les villes développées d'Asie du Sud-Est enrichit cette typologie en proposant les notions de villes bus (« *bus cities* ») et de villes motocycles (« *motocycles cities* »).

A - *La ville piétonne*

La ville piétonne correspond à la période antérieure à l'apparition des véhicules à moteur et au tout début de son introduction. La marche à pied étant le premier mode de transport possible, l'espace urbain depuis les premières villes apparues au Moyen-Orient (Bairoch, 1996) s'est structuré autour de ce mode.

La superficie est limitée à quelques hectares, les densités de population sont particulièrement fortes. Newman et Hogan (Newman, Hogan, 1987) suggèrent une densité de population de 10.000 à 20.000 hab/km^2. Ces villes présentent une grande mixité dans l'utilisation de l'espace. Leur population est donc restreinte : en 1800, la plus grande ville du monde était Beijing avec 1,1 million d'habitants,

alors que Rome aurait déjà atteint 1,2 million de personnes en 200 après JC (Moriconi-Ebrard, 2000). Les déplacements sont de courte distance mais très dispersés dans la ville (Newman, 1996).

Les seuls autres modes de transports terrestres jusqu'au 19ème siècle utilisaient la force animale pour tirer des charges lourdes (charrette, âne, cheval,…) ou pour assurer aux plus riches un gain en vitesse et en confort par utilisation de l'énergie animale (char, calèche) ou humaine (chaise à porteur, pousse-pousse). De nos jours, il n'y a pratiquement plus d'agglomération dont le transport se fasse exclusivement à pied.

B - *La ville des transports en commun*

La ville du transport en commun est celle qui a émergé avec l'avènement de la bicyclette, du tramway et du rail urbain dans les pays industrialisés entre 1860 et 1940. Les villes s'étalent de 10 à 20 km et prennent une forme étoilée autour des lignes de transport en commun elles-mêmes en étoile. Les densités de population deviennent plus faibles, entre 5.000 et 10.000 hab/km^2. Les zones d'activité et les zones résidentielles tendent à s'échelonner le long des voies du transport public. Un centre d'activité apparaît du fait de l'accessibilité du centre de la ville. Le cœur de la ville conserve une densité et une mixité élevées ; les déplacements y sont de courte distance. On trouve souvent des poches piétonnes de densité moyenne autour des stations de rail. Les déplacements sont radiaux et de longue distance. (Newman, 1996)

La vitesse commença à s'ouvrir aux plus pauvres par les systèmes de taxis ou de transport collectif apparus au 17ème siècle à Paris. Puis en 1852, New York eu la première ligne de tramway du monde – avec traction animale. Dans la deuxième moitié du 19ème siècle on chercha à substituer le moteur thermique aux chevaux qui présentaient de nombreux inconvénients. En 1863 Londres disposait du premier chemin de fer souterrain à locomotive à vapeur. Après 1880, les villes européennes se sont dotées du tramway électrique. En France le premier fut construit à Clermont Ferrand en 1890.

Cette représentation schématique de la ville du transport en commun se justifie particulièrement avant la commercialisation de l'automobile. L'automobile n'existait pas encore à la fin du 19ème siècle, alors que les transports en commun se développaient déjà. Avant la seconde guerre mondiale en Europe, le taux de motorisation était de l'ordre de 40 voitures pour 1.000 habitants.

C - *La ville automobile*

La ville automobile est apparue après la seconde guerre mondiale dans les pays développés avec la généralisation de la motorisation. Elle a été favorisée par des investissements massifs dans des infrastructures routières qui ont permis un étalement spatial dans un rayon de 50 km, avec une densité de population de l'ordre de 1.000 à 2.000 hab/km^2. Ce modèle urbain est typiquement celui observable aux Etats-Unis, au Canada ou en Australie.

Il y a très peu de mixités des activités dans l'espace. Les emplois sont concentrés dans le CBD et les populations résident en périphérie. L'automobile est le mode de transport dominant et la forte ségrégation des activités dans l'espace ne permet pas l'utilisation des modes plus lents. Les transports en commun sont marginalisés et ne sont finalement destinés qu'aux populations ne pouvant pas conduire ou n'en ayant pas les moyens. Le cœur de la ville est souvent commercial avec une forte densité. Les commerces, services et industries sont séparés et dispersés dans l'aire métropolitaine. Les déplacements sont de longue distance et très dispersés (Newman, 1996).

D - *La ville bus*

Barter (Barter, 1999) remarque que dans les villes du Sud, les différents modes de transport n'apparaissent pas les uns après les autres, comme ce fut le cas dans les villes du Nord qui ont pu s'adapter à l'augmentation des vitesses de déplacement par une dé-densification progressive. Au

moment de l'arrivée de l'automobile, les villes développées avaient connu la phase de la ville des transports en commun et donc un certain étalement urbain.

Ainsi Barter souligne que les villes européennes en 1960 – alors que la densité de population était en moyenne inférieure à 10.000 hab/km^2 et le taux de motorisation de 100 véhicules pour 1.000 habitants – avaient développé un réseau de transports en commun efficace, notamment un réseau ferroviaire dont les vitesses moyennes sont plus élevées que celles du bus. Les villes du Sud n'ont généralement pas mis en place de tel réseau de rail. Dès les années 1960, leur système de transport collectif est basé sur le bus, alors que les taux de motorisation sont encore insignifiants. Barter propose alors l'appellation de « ville bus ». Celles-ci ont de fortes densités de population – supérieures à 15.000 hab/km^2 – et le bus représente le mode majeur de déplacement. Ces villes ne vont pas voir leur densité de population baisser significativement alors même que les modes de transports motorisés privés commencent à envahir la voirie.

Les villes du Sud s'avèrent alors beaucoup plus vulnérables à l'arrivée de l'automobile que ne l'étaient les villes occidentales. Le rythme accéléré de croissance des parcs automobiles amène irrémédiablement à une saturation des infrastructures encore peu développées. D'autant plus que la construction de nouvelles infrastructures est fortement contrainte par la faible capacité financière et politique des institutions en charge de la gestion du développement urbain. A la différence des « villes dépendantes de l'automobile » (Newman, Kenworthy, 1999), Barter parle de « ville saturée par l'automobile ». Dans les embouteillages la vitesse des transports en commun étant plus faible que celle des véhicules particuliers, la vitesse de déplacement augmente uniquement pour les individus qui acquièrent une voiture ou une moto (Gakenheimer, 1997).

E - *La ville motocycle*

Les motocycles jouent un rôle croissant dans la mobilité des villes du Sud, notamment du Sud-Est asiatique. A Hô-Chi-Minh-Ville par exemple le taux de possession de motocycles était en 1999 de 300 véhicules pour 1000 habitants. A Bangalore, les deux roues représentent aujourd'hui la majorité des véhicules (74%) et 31% des déplacements ; leur taux de croissance est en moyenne de 9,5% par an depuis 1991. Par comparaison, seulement deux ménages sur dix possèdent une voiture et l'automobile ne représente que 5% des déplacements. Les motocycles permettent d'accéder à une vitesse importante pour un coût d'acquisition du véhicule bien moindre que celui d'une automobile. Ils ont l'avantage dans le système urbain de consommer peu d'espace pour leur stationnement et leur circulation comparativement à l'automobile alors qu'ils offrent une vitesse similaire, et même supérieure dans les embouteillages. Les motocycles sont donc une adaptation logique à la pénurie de voirie. Barter (Barter, 1999) propose alors l'appellation de « ville motocycle ».

F - *Conclusions*

Cette typologie reprend l'hypothèse de Zahavi (Zahavi, 1980) d'une double constance budgétaire et temporelle. La vitesse, compte tenu de son accessibilité en termes de budget et de son usage selon la constante temporelle de déplacement quotidien observée par Zahavi, permet de définir l'aire de déplacement des individus.

En retenant la conjecture de Zahavi, Schaeffer puis Barter estiment que l'adoption de modes de transport plus rapides transforme fortement l'organisation spatiale des villes. L'augmentation de la vitesse moyenne du système de transport d'une ville entraîne un besoin d'espace. Celui-ci se traduit par un étalement urbain et une diminution des densités. **Les modes de transports dominants déterminent donc les structures urbaines.** L'augmentation des distances parcourues due à l'augmentation des vitesses et à l'étalement urbain se traduit par l'augmentation de la consommation énergétique comme l'ont montré Newman et Kenworthy (Newman, Kenworthy, 1989).

Cette approche met en avant les relations entre les modes de transport utilisés et les distances parcourues par les populations urbaines, et par là les conséquences sur la distribution spatiale des activités et résidences et la distribution spatiale des déplacements, soit la structure urbaine définie par Bertaud.

IV - Le couple « transport – usage des sols » au cœur de la structuration urbaine, et par là des consommations énergétiques dans les transports urbains

Avec Newman et Kenworthy, nous avons vu dans la première section de ce chapitre que les consommations énergétiques et émissions de CO_2 liées aux transports urbains ne dépendent pas de la richesse de la ville. D'autre part, Newman et Kenworthy montrent qu'il existe une forte corrélation entre les densités moyennes, la répartition modale des déplacements et les consommations énergétiques dans les transports urbains.

Cependant les critiques de ces travaux mettent en lumière le fait que les approches agrégées ont une portée limitée aussi bien dans la compréhension des déterminants des consommations énergétiques que dans l'élaboration d'une stratégie de long terme pour infléchir leur croissance. Il est donc nécessaire d'entrer plus en profondeur dans la complexité systémique urbaine pour démêler les déterminants des consommations énergétiques liées aux transports urbains.

Nous avons ensuite présenté deux analyses des déterminants des consommations énergétiques. Ces deux analyses ne mettent pas en avant les mêmes facteurs.

La première, exposée dans la deuxième section, repose sur les travaux de Bertaud et insiste sur le rôle fondamental des politiques d'urbanisme menées sur le long terme. Bertaud définit la structure spatiale urbaine par deux éléments complémentaires : la distribution spatiale de la population et la distribution spatiale des déplacements. Pour Bertaud, la structure spatiale d'une ville est déterminée par les forces du marché en interaction avec l'environnement réglementaire, les investissements dans les infrastructures et la fiscalité. Il analyse ensuite le rôle de la structure urbaine dans l'efficacité des alternatives modales de transport. Bertaud démontre ainsi que le type de structure urbaine sélectionne le mode de transport dominant.

A l'inverse, la seconde, exposée dans la troisième section, repose sur les travaux de Schaeffer et met en avant l'effet structurant des infrastructures de transport sur l'évolution de l'organisation spatiale des villes. En retenant la conjecture de Zahavi, Schaeffer estime que l'adoption de modes de transport plus rapides détermine l'espace accessible par les citadins et donc les structures urbaines. L'augmentation des distances parcourues due à l'augmentation des vitesses et à l'étalement urbain se traduit par l'augmentation de la consommation énergétique. Cette approche met donc en avant les relations entre les modes de transport utilisés et les distances parcourues par les populations urbaines, et par là les conséquences sur la distribution spatiale des activités et résidences et la distribution spatiale des déplacements, soit la structure urbaine définie par Bertaud.

Par conséquent, même si ces deux analyses ne mettent pas en avant les mêmes déterminants, leur rapprochement éclaire le caractère fondamental des relations entre le système de transport et le système d'usage des sols pour les consommations d'énergie et émissions de CO_2 liées aux transports urbains. Ces deux analyses n'insistent pas sur les mêmes aspects de la relation systémique – la première aborde la complexité par les usages du sol ; la seconde par les technologies transport – mais elles s'accordent pour dire que les effets d'un des deux systèmes sur les consommations énergétiques passent par l'autre système.

La demande de déplacement est une demande dérivée. Les besoins de déplacements naissent des besoins d'échanges des individus dans la ville et de la dispersion des lieux d'activité à travers la ville. Si la structure urbaine change, la demande de déplacement est modifiée.

Réciproquement, les modifications de l'offre de transport entraînent des transformations multiples :

Tout d'abord la consommation d'espace par un mode de transport réduit l'espace disponible pour les autres et impose des barrières à leur usage. Des routes plus nombreuses et plus larges peuvent

réduire l'accessibilité de certaines destinations en vélo et à pied. Les corridors dédiés aux bus (les « sites propres ») réduisent l'espace offert aux autres véhicules et peuvent ainsi décourager l'usage de la voiture. Mais les effets d'une modification de l'offre de transport ne portent pas seulement sur les choix d'itinéraires et sur le chaînage des déplacements ou de modes, elles influencent le choix de la destination du déplacement, le nombre de déplacements et des choix plus fondamentaux tels que la décision d'achat d'un véhicule, ou encore les localisations d'emplois et d'activités ou de logements. Les conséquences à moyen et long terme des modifications des conditions de transport sont des révisions de certains choix d'activités, comme les lieux d'achat, d'emploi et de résidence, et donc de la structure urbaine.

Ainsi par exemple, le bénéfice à long terme le plus important d'un Transport Rapide de Masse (TRM), bus ou rail, est sans doute son effet de concentration du développement urbain dans des corridors d'accessibilité. Il offre les conditions pour résister à un étalement urbain diffus. Mais cette opportunité ne devient réalité que si la mise en place d'un TRM s'accompagne de politiques d'usage des sols et de transport complémentaires. En effet, la construction d'un TRM augmente la mobilité ce qui, étant donnée la constante de Zahavi, se traduit généralement par une augmentation de l'aire urbaine. Il est donc nécessaire, nous y reviendrons dans le chapitre 2, d'encadrer la construction d'un TRM par une politique d'usage des sols.

Cela plaide en faveur d'**une analyse des consommations énergétiques et des émissions de CO_2 liées aux transports urbains centrée sur le fonctionnement du couple « transport – usage des sols ».** Ce couple est au cœur des dynamiques de structuration de l'espace urbain, et par là des consommations énergétiques engendrées par les transports urbains.

V - Les tendances inquiétantes des processus de structuration urbaine

Premier pas pour l'élaboration du «Plan de déplacements urbains de l'Île-de-France», un diagnostic sur les grandes tendances et les mécanismes d'évolution des déplacements dans cette région de 10,5 millions d'habitants fut effectué en juin 1998. Les tendances sont alarmantes. En quinze années (1976 – 1991), alors que le nombre total de déplacements quotidiens par personne restait globalement stable, l'évolution des déplacements connaissait une croissance de 33% en voiture, un gain de 6% seulement du transport collectif et une baisse de 19% de la marche à pied.

Ce diagnostic met en lumière des tendances de développement que l'on peut qualifier de non durables :

- la partie la plus dense de la métropole (> 400 habitants et emplois par hectare), où le transport collectif joue un rôle prédominant (47 % des déplacements), reste stable ou en très léger déclin démographique
- la partie la moins dense de la métropole (< 30 habitants et emplois par hectare), où le transport collectif joue un rôle marginal (12 % des déplacements), connaît la plus forte dynamique de croissance de population et d'emplois.

Les tendances de stagnation voire de diminution de population dans les zones denses de l'agglomération conjuguées avec une augmentation importante de la population et de l'emploi dans les couronnes éloignées ainsi que l'inadaptation du réseau de transports collectifs aux déplacements banlieue à banlieue en fort développement expliquent en grande partie les tendances lourdes de croissance de la circulation automobile.

Le tableau suivant présente quelques éléments généraux de l'évolution «densité urbaine / transport» dans le monde. La densité urbaine a tendance à baisser dans l'ensemble des métropoles considérées et tout particulièrement dans celles d'Europe occidentale (-20 % en vingt années). Malgré les gains d'usage du transport public (sauf en Australie), l'usage de l'automobile croît de façon marquée, notamment en raison de l'allongement des déplacements domicile travail.

Tableau 4 : Évolution de la densité urbaine et de l'usage des transports

Métropoles	américaines	australiennes	européennes	asiatiques
Densités urbaines globales (habitants+emplois / ha)				
1970	25	22	102	260
1990	23	18	82	235
Évolution 70-90	-8 %	- 18%	-20 %	-3 %
Distance domicile travail (km)				
1980	13	12	8,1	
1990	15	12,6	10	
Évolution 80-90	+15 %	+5 %	+23 %	
Usage de l'automobile (km/an/pers)				
1980	8.800	5.800	3.500	900
1990	10.900	6.500	4.500	1.500
Évolution 80-90	+24 %	+12 %	+29 %	+67 %
Utilisation des transports publics (déplacement TC/an/habitant)				
1970	48	118	241	430
1990	63	92	318	496
Évolution 70-90	+3 %	-22 %	+32 %	+10 %
Part modal TC, moyenne 1990	2,8 %	7,6 %	22,3 %	65 %

Source: Newman, Kenworthy., 1999.

Selon Bertaud (Bertaud, 2004), ces évolutions inquiétantes devraient se prolonger. Pour cet expert, étant données la « résilience[12] » et les dépendances de sentier[13] des structures urbaines, il est plus facile de diminuer la densité que de l'augmenter, et plus facile pour une ville monocentrique de devenir polycentrique que l'inverse. Il en conclut qu'il existe une tendance globale dans l'évolution des structures urbaines :

- les villes s'agrandissent, les CBD aussi. En s'élargissant, les centres perdent la compacité et donc la proximité qui faisait leur attrait. Il est alors inévitable que des centres secondaires émergent et que le degré de monocentricité diminue avec l'augmentation de la taille. Les villes monocentriques tendent donc à l'être moins ;
- puisque les revenus et la mobilité augmentent dans les plupart des mégapoles, les densités tendent à diminuer ;
- en conséquence, toujours selon Bertaud, le rôle des transports en commun va diminuer, malgré les lourds investissements et les subventions.

Finalement, Bertaud (Bertaud, 2004) imagine le futur urbain comme constitué de deux types de ville, toutes les deux polycentriques en terme de distribution des emplois. La première conserverait un centre puissant et prestigieux avec un niveau élevé d'aménités, entouré d'une aire résidentielle à forte densité habité principalement par les classes moyennes et riches. La seconde serait un pur marché du travail sans centre prestigieux, les aménités seraient distribuées dans l'ensemble de l'aire urbaine. Ces deux types de ville ne vont pas dans le bon sens, du point de vue de la soutenabilité environnementale. Ils engendrent une dépendance accrue à la voiture, les transports en commun conventionnels étant incapables de satisfaire une demande dispersée.

En ce qui concerne l'autre membre du couple «transport – urbanisme», le transport, Godard (Godard, 2005) fait le constat d'une «double trappe» menaçant les « entreprises formelles » (publiques

[12] Bertaud emprunte le terme « résilience » à la physique pour caractériser la résistance des structures urbaines à un choc (Grand Larousse).

[13] Les dépendances de sentier désignent la réduction du domaine du possible lié aux irréversibilités technologiques.

et privées) de transport urbain au Sud: la concurrence des transporteurs informels et des modes individuels. Cet auteur constate ainsi, en particulier en Afrique et au Moyen-Orient, la disparition des entreprises formelles et le développement du transport artisanal. Or ces transporteurs artisanaux traditionnels sont en général non seulement moins efficaces énergétiquement mais aussi plus difficiles à intégrer dans des programmes de réduction des consommations énergétiques.

De telles évolutions ne sont évidemment pas souhaitables du point de vue de la soutenabilité environnementale. Le pessimisme des experts qui les considèrent inévitables, tels Bertaud, n'est-il cependant pas excessif ? Nous avons souligné la diversité des villes actuelles. Cette diversité est certes le résultat de puissantes forces de marché, mais avec Litman et Laube[14], nous pensons qu'elles résultent aussi des politiques urbaines passées, et qu'aujourd'hui comme hier, des politiques coordonnées d'offre de transport et d'usage des sols peuvent infléchir significativement les croissances urbaines vers des trajectoires soutenables.

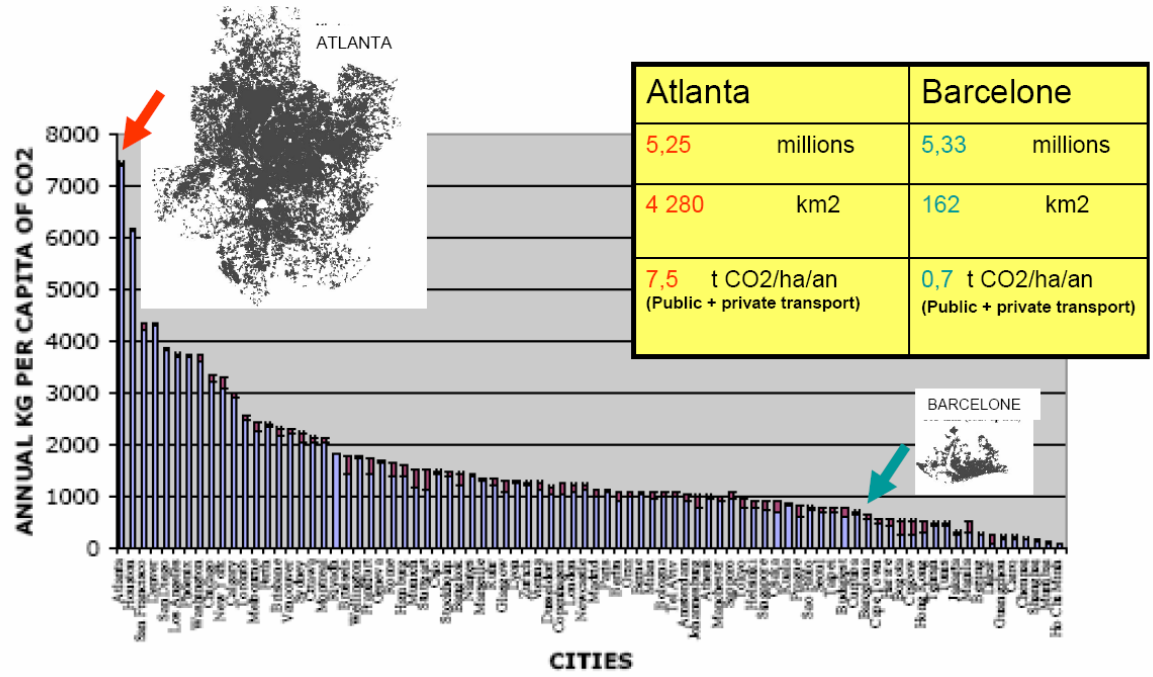
Pour terminer ce premier chapitre et avant de présenter dans le chapitre 2 une revue critique de la littérature sur les leviers d'action à la disposition des aménageurs urbains pour placer les transports dans les villes du Sud sur des trajectoires environnementalement soutenables, penchons-nous sur deux villes illustrant l'étendue du domaine des possibles : Atlanta et Barcelone.

VI - Une fatalité ? Non : Atlanta et Barcelone

La comparaison de deux villes, Atlanta et Barcelone, avec des populations et des PIB par habitant du même ordre de grandeur schématise le spectre des avenirs possibles pour les villes du Sud (graphe 11). Atlanta est 28 fois plus étalée que Barcelone. A Atlanta la plus longue distance entre deux points de l'aire urbaine est 137 km, à Barcelone 37 km. Les faibles distances des déplacements à Barcelone dues aux fortes densité et mixité permettent aux habitants d'en effectuer 20% à pied. A Atlanta, les déplacements à pied ne sont même pas recensés. Si bien que les émissions de CO_2 liées au transport urbain sont 11 fois plus faibles à Barcelone qu'à Atlanta. Mais, comme nous l'avons vu, la densité moyenne n'est pas le seul facteur qui influence la longueur des déplacements. Aussi il apparaît intéressant d'étudier brièvement les processus historiques de structuration de l'espace urbain dans ces deux villes. L'éclairage mutuel de ces deux cas « *sui generis* » permet de mettre en valeur le rôle déterminant des politiques publiques. En effet, si certains paramètres de la structuration urbaine sont subis, d'autres sont choisis.

[14] Cf. Note 6 ci-dessus.

Graphe 11 : Quel avenir pour les villes du Sud : Atlanta ou Barcelone ?



Source : Elaboration par l'auteur à parie des données de (Newman, Kenworthy, 1999) et Bertaud (2001)

A - *Atlanta, une urbanisation par étalement spatial*

1) Une planification urbaine accompagnant l'expansion spatiale

Au début de la guerre de Sécession (1861–1865), Atlanta est une petite ville de 11.000 habitants. La grande ville de Géorgie est alors Savannah. L'expansion urbaine d'Atlanta commence vraiment qu'avec la fin de la guerre et la reconstruction de la ville dévastée par un incendie. Atlanta jouit d'un climat humide subtropical et de terres fertiles propices à la culture cotonnière, dont la Géorgie s'est fait une spécialité. Par ailleurs, la ville dispose d'une très bonne desserte : liaisons ferroviaires avec les villes du Nord ; escale aéroportuaire sur la route de l'US Postal Service entre New York et Miami à partir de 1930. De là, elle réussit à développer une importante industrie textile, qui devient l'une des plus dynamiques du pays dans les années 1920. Cette industrie florissante a engendré un afflux massif de travailleurs ruraux du vieux Sud, souvent d'origine afro-américaine. Cette croissance démographique s'est alors accompagnée d'une ségrégation ethno-socio-spatiale déterminante pour la structuration urbaine d'Atlanta. L'étalement de la ville s'accélère en conséquence, d'autant qu'aucun plan d'urbanisme ne le contrôle. Il est renforcé par l'expansion de la culture cotonnière, grande consommatrice d'eau et de sols, qui entraîne un éloignement progressif des activités et des hommes du centre-ville. Cependant, il faut attendre l'après seconde guerre mondiale pour assister à un véritable boom démographique. L'installation de nombreux vétérans y joue un rôle non négligeable, mais c'est surtout le boom du secteur privé qui est à l'origine de ce phénomène d'une incroyable rapidité. Les « white collars » affluent et s'installent en périphérie pour fuir le centre-ville dégradé et majoritairement peuplé par la classe populaire afro-américaine, tout en profitant d'un prix du foncier très compétitif. (New Georgia Encyclopedia). Ce schéma de développement économique, démographique et spatial s'intensifie dans les années 1970 avec la forte croissance de la « Sunbelt » s'appuyant sur le développement du tertiaire, de l'informatique et des technologies de l'information. Les nouvelles industries, qui fuient un centre-ville trop cher et congestionné, s'installent surtout dans les zones périphériques, entraînant avec elles toute leur main d'oeuvre qualifiée et à la recherche d'un cadre de vie agréable.

La ville crée sa première agence régionale de planification en 1947 : the Metropolitan Planning Commission, qui englobe cinq comtés, qui sera absorbée dans les années 1960 au sein de l'Atlanta Regional Commission (ARC) réunissant dix comtés. L'ARC a un pouvoir et donc des effets très limités : malgré les projets de rénovation du centre-ville, l'étalement urbain se poursuit. (Marshall Kaplan, Gans, Kahn, 1970). Au moment de l'explosion démographique des années 1970, les autorités autorisent, voire encouragent la construction de résidences et infrastructures routières en périphérie. Dans les années 1980-1990, la croissance spatiale s'est poursuivie. Les autorités se sont contentées de repousser les limites territoriales de l'ARC qui fut englobée dans l'Atlanta Metropolitan Statistical Area (MSA) comptant 21 comtés. L'expansion polycentrique de la région urbaine a donc été favorisée à la fois par l'attractivité de la périphérie, la baisse d'intérêt pour le centre ville et par une planification urbaine favorable à l'étalement urbain. En effet, les zones périurbaines d'Atlanta bénéficient d'une forte intégration, avec des services et infrastructures, notamment un réseau autoroutier particulièrement dense, qui compense la faiblesse des transports en commun. D'autre part, elles conservent un prix du foncier relativement abordable. (Hartshorn, Ihlanfeldt, 2001). Face à cette périphérisation et à l'absence d'urbanisme rénovateur, la ville-centre d'Atlanta a décliné : la croissance démographique y est devenue très faible et les migrations du centre vers la périphérie se sont intensifiés. Entre 1990 et 1996, alors que la population de la périphérie d'Atlanta a cru de plus de 40%, la population du centre-ville n'a augmenté que de 2%. Ainsi, alors qu'Atlanta est en 1996 la troisième métropole des USA, la ville elle-même n'arrive qu'au trente-huitième rang des villes américaines en terme de taille. Depuis le début des années 1990, la surface urbanisée croit de presque 50% tous les 6 ans, urbanisant plus de 200 hectares d'espace vert chaque semaine. Avec le taux de croissance démographique le plus élevé des villes du Sud des USA, les experts prédisent un doublement de la population d'ici à 2050. (New Georgia Encyclopedia).

2) La politique transport en faveur de l'automobile

Ce n'est que dans les années 1960 que les autorités ont reconnu l'importance de promouvoir les transports en commun, notamment par le biais de la création d'une commission d'étude sur le transport métropolitain à Atlanta, puis la création de la première entreprise publique de transports en commun, The Metropolitan Atlanta Regional Transit Authority (MARTA), en 1965. Il faut cependant attendre 1972 pour que la MARTA entre véritablement en action. Elle lance alors son projet de réseau de transport, the Atlanta Transit System, et met en place le premier réseau de bus de la ville. Dans les années 1970, la MARTA reçoit 800 millions de dollars de prêts de la part du gouvernement fédéral pour planifier l'acquisition de terres et concevoir un réseau de trains rapides. Le projet aboutit en 1979 avec la création du premier train urbain de la région urbaine. Atlanta compte aujourd'hui un réseau de métro qui couvre 79, 2 km. (Coslor, 2000)

Il semble aujourd'hui impossible de construire un réseau de transports en commun suffisamment dense pour satisfaire les besoins de déplacement des habitants de la région dans une ville déjà aussi étalée. Beaucoup des emplois de la région se situent en périphérie, dans des zones très mal desservies par les transports en commun et donc dépendantes de la voiture. A l'inverse, appuyé par les différents niveaux administratifs, le réseau routier croit rapidement, accompagnant les développements du marché de l'immobilier et de l'emploi. Aujourd'hui, le réseau routier en Géorgie compte de 181.848 km de routes et autoroutes. Six autoroutes inter-états permettent aux citadins de circuler dans la région métropolitaine d'Atlanta. Durant les années 1960 et 1970, l'expansion urbaine s'oriente vers le nord, le long des Interstates Highways I-285 I-75 nord et I-85 nord, puis dans les années 1980 et 1990, il se dirige de plus en plus vers le sud, suivant la construction de l'I-20 est et ouest, ainsi que du prolongement de l'I-75 et de l'I-85 au sud. Cet étalement spatial a alimenté la croissance du trafic routier, qui, en retour, a encouragé l'expansion du réseau routier. (Hartshorn, Ihlanfeldt, 2001).

Le Georgia Department of Transportation (GDOT), en charge de la planification, de la construction et de l'entretien du réseau de routes et de ponts de l'Etat, mène un programme appelé Governor's Road Improvement Program (GRIP). Ce programme a pour objectif de relier chaque ville de Géorgie au réseau d'autoroute inter-Etats, mais surtout de faire en sorte qu'aucun endroit en Géorgie ne se trouve à moins de 32 km d'une route à quatre voies. Ce programme a permis, rien qu'en 2002, de construire plus de 4.500 kilomètres de routes dans toute la Géorgie. Le phénomène est

d'autant plus important qu'il est soutenu par l'Etat fédéral, qui a prévu d'injecter, au travers du Transportation Equity Act for the 21st century de 1998, plus de 173,1 millions de dollars en six ans dans le réseau routier, contre seulement 41 millions dans les transports publics. Il est évident qu'un rythme aussi soutenu de construction routière favorise l'étalement urbain, l'oriente géographiquement, et détermine le niveau de consommations énergétiques dans les transports urbains. (Hartshorn, Ihlanfeldt, 2001).

B - *Barcelone, une urbanisation planifiée*

Barcelone fut fondée sur le Mons Taber, petite colline aujourd'hui encore au centre de la ville, par Rome aux alentours du 3ème siècle avant JC. Au 13ème siècle, Barcelone se dote de murailles. Les remparts vont être un élément structurant de l'urbanisation à Barcelone qui va croître à l'intérieur jusqu'à la révolution industrielle. Le 19ème siècle est celui de la rupture avec une urbanisation essentiellement intra-muros. Deux dates capitales marquent ce basculement : la destruction des murailles est autorisée en 1854 ; le Plan Cerda, projet d'expansion de la ville au delà des remparts est lancé en 1860. Ce plan préparé par l'ingénieur Idelfonso Cerda est à l'origine de « l'ensanche », zone urbaine basée sur un quadrillage régulier de blocs égaux. Nourrie par un exode rural important et par le dynamisme économique de Barcelone, la population barcelonaise double entre 1850 et 1900, et cette croissance démographique massive de la ville se poursuit pendant un siècle environ (de 1870 à 1970). Elle sera régulièrement accompagnée par des plans d'urbanisme cherchant à encadrer et structurer rationnellement l'établissement de ces nouveaux citadins. (Ferras, 1977)

Ce volontarisme planificateur fut accompagné tout au long du 20ème siècle d'un développement intense des transports en commun. Le 30 décembre 1924 la première ligne de métro construite par une société privée (Gran Metropolitano de Barcelona) est ouverte. Un an et demi plus tard, le 10 juin 1926, une deuxième ligne de métro, construite par une société concurrente (Metropolitano Transversal) entrait en service. Cette ligne avait été créée initialement pour connecter deux lignes de chemin de fer national. Le 19 décembre 1926, une troisième ligne de métro fut inaugurée. Jusqu'en 1946, il n'y eu que peu de nouvelles ouvertures, essentiellement à cause de la mauvaise conjoncture économique. En 1951 la communauté de Barcelone prit le contrôle des deux sociétés d'exploitation Gran Metropolitano de Barcelona et Metropolitano Transversal. L'objectif était de parvenir à réaliser un réseau de métro adapté au nombre toujours croissant de passagers. En 1954 la ligne 1 fut prolongée. Cinq années plus tard, le 21 juillet 1959, une cinquième nouvelle ligne fut inaugurée. En 1961 les 2 sociétés exploitantes fusionnèrent pour faciliter le développement du réseau de Barcelone. Dans les décennies suivantes le réseau existant fut régulièrement prolongé sans pour autant que de nouvelles lignes soient construites. Il existe également, à côté du réseau de métro, un réseau RER constitué de 3 lignes. (Négrier, Tomas, 2003). Le tramway, disparu à la fin des années 1970, a été réintroduit avec l'inauguration en mai 2004 de 4 nouvelles lignes d'une longueur totale de 45 kilomètres. Leur fonction est d'assurer une desserte des quartiers périphériques tout en créant des connexions avec les lignes de métro. Un réseau dense de bus sillonne la ville.

Ces premiers éléments mettent en évidence que Barcelone, à l'inverse d'Atlanta, ne s'étale pas mais croît sur son territoire originel plutôt restreint. Comment expliquer cette spécificité barcelonaise ?

D'abord il est nécessaire de se pencher sur les facteurs géographiques qui ont conditionné la structuration de la ville. La mer Méditerranée constitue la première barrière : la façade Est de la ville est une façade littorale. Ensuite le relief influe le développement urbain : la ville romaine se caractérisait déjà par un délaissement des hauteurs qui a ensuite perduré. Le Montjuich est considéré comme un obstacle dans le développement urbain. La colline ne sera urbanisée qu'à partir de 1929 avec l'exposition universelle et sera aussi le lieu d'accueil du village olympique en 1992. (Négrier, Tomas, 2003).

Il convient aussi de revenir sur des données politiques. Dans le cadre de l'aménagement territorial national, la position de Barcelone comme challenger possible de Madrid lui a nui sous le régime franquiste. Il semble en effet que Franco ait cherché à limiter l'expansion de Barcelone et à préserver la suprématie de Madrid. (Négrier, Tomas, 2003).

A ces questions de rivalités politiques vient s'ajouter un facteur économique. En effet, à la fin de la période franquiste (ce qui pourrait donc signifier la libération des volontés d'expansion barcelonaise) commence le déclin industriel de l'agglomération de Barcelone, du fait en particulier de l'effondrement d'un certain nombre d'industries traditionnelles. (Négrier, Tomas, 2003).

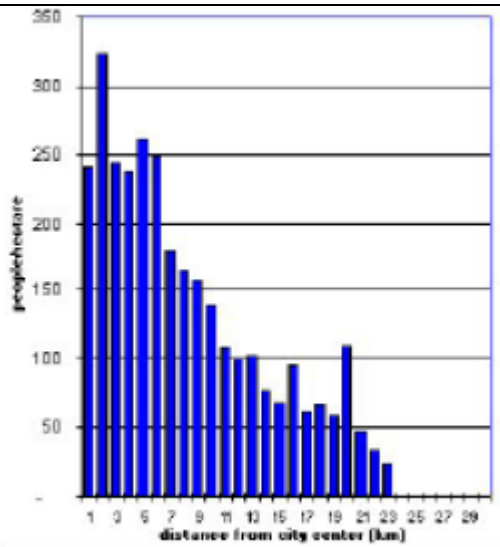
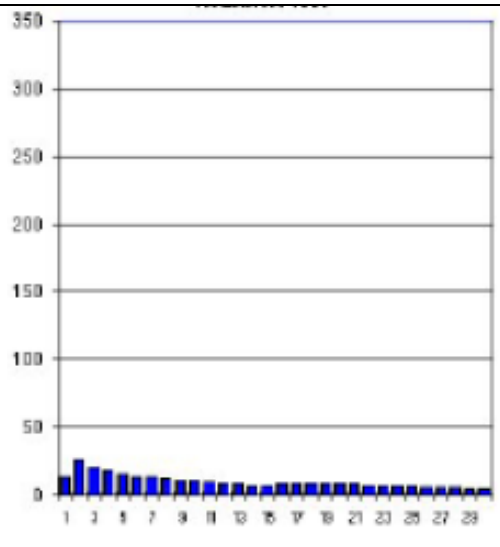
Enfin et surtout, il faut noter l'apport capital de la planification urbaine à la structuration urbaine. La politique urbaine locale se caractérise en effet par la prolifération des plans d'urbanisme. Pour preuve cette liste non exhaustive des plans qui sont succédés. Nous avions évoqué précédemment le Plan Cerda en 1860, en 1917 est lancé le plan Jaussely, en 1934 le plan Macia, en 1953 le plan « comarcal », en 1959 le plan « provincial » puis la charte municipale en 1960, le plan général de régulation urbaine en 1974, le plan général métropolitain en 1976 et enfin les plans stratégiques de 1990, 1994, 1999, 2002. La longueur de cette liste à elle seule donne le sentiment que l'on touche ici à l'une des spécificités de Barcelone, qui explique en partie l'état actuel de la ville. Ainsi la régulation constitue un élément central et particulier à Barcelone dans son processus historique de structuration de l'espace urbain. La planification urbaine et les politiques d'investissement dans les transports en commun ont permis une densité et mixité fonctionnelle importante. Le maintien de cette densité est ainsi une priorité des autorités politiques locales. Dès 1987 est créé le parc Collserola, espaces verts périurbains d'environ 9000 hectares qui visent à protéger les milieux naturels contre l'étalement urbain. A ce jour, quatre prolongements des lignes de métro existantes et une ligne nouvelle sont en cours de construction. (Négrier, Tomas, 2003).

Ainsi si la structuration de Barcelone se caractérise par des contraintes imposées (données géographiques, volonté franquiste de limiter l'expansion de la ville) mais surtout par des politiques urbaines de densification et d'organisation de l'établissement de la croissance démographique et économique (planification urbaine, régulation foncière et politique de transport).

C - *Conclusions*

Barcelone est une ville compacte et beaucoup plus dense qu'Atlanta. Comme nous l'avons vu avec les analyses de Bertaud, l'efficacité et l'efficience d'un réseau de transports en commun sont optimisées par une aire urbaine compacte et monocentrique: 99 km de lignes de métro suffisent pour assurer les besoins en déplacements de 30% des habitants de Barcelone. D'autre part, ce réseau de transports en commun assure une fluidité des principaux axes routiers pour accéder au centre-ville. Enfin Barcelone jouit d'une continuité urbaine, en ce qu'aucune autoroute ne vient fragmenter la ville.

Graphe 12 : Profile de densité de Barcelone et Atlanta. 1990

Barcelone 1990	Atlanta 1990
	
Source : Bertaud, 2001	

Contrairement à Barcelone, Atlanta est une ville très peu dense et polycentrique. De plus, s'accompagnant habituellement d'une importante séparation entre les divers usages du sol – usages résidentiels, industriels ainsi que commerciaux et de services – l'étalement urbain induit un accroissement des déplacements, pour lesquels la voiture individuelle devient indispensable. Enfin, trois autoroutes Interstate entrecoupent la ville : l'Interstate 20 va de l'est à l'ouest alors que l'Interstate 75 va du nord-ouest au sud-est, et que l'Interstate 85 se dirige vers le sud-ouest en provenance du nord-est. Ces trois voies principales se rejoignent au Downtown Connector où passent plus de 340.000 véhicules par jour. Atlanta est donc non seulement une ville polycentrique, mais également fragmentée.

Cet éclairage mutuel entre Atlanta et Barcelone permet d'identifier les facteurs de structuration urbaine que l'on subit, à savoir une géographie plus ou moins contraignante, une croissance économique et démographique plus ou moins intense, ainsi que l'histoire politique, et ceux que l'on choisi. Cette brève comparaison met en avant le rôle déterminant des politiques publiques, notamment la planification urbaine, les politiques restrictives au niveau du foncier et l'investissement dans les transports en commun. Le développement urbain de Barcelone est à ce titre un modèle de volontarisme politique en matière de structuration urbaine. Barcelone ne s'est pas contentée de ses acquis, elle est devenue un modèle de ville durable grâce à une planification urbaine rationnelle.

Denses, mixtes, monocentriques, fortement structurées par un urbanisme et une offre de transport privilégiant les transports en communs de masse complétés par le vélo, la marche, en bref, Barcelone (ou Hong Kong) plutôt qu'Atlanta, tel devrait être l'objectif général pour les villes du Sud. De nombreuses villes du Sud possèdent aujourd'hui encore ces caractéristiques ; aussi la question n'est heureusement pas tant de savoir comment accroître la densité ou comment réduire l'usage de la voiture mais plutôt comment conserver ces structures urbaines avantageuses.

VII - Conclusions

L'explosion urbaine dans les pays du Sud est sans conteste un des défis environnementaux majeurs du siècle. Les tendances actuelles des dynamiques urbaines sont inquiétantes pour le changement climatique, car elles donnent une place croissante à l'automobile au détriment des transports en commun et non motorisés. C'est vrai au nord comme au sud, mais l'enjeu essentiel est au sud : vers quoi vont tendre les villes du Sud ? Atlanta ou Barcelone ? Brisbane ou Hong Kong ?

Schématiquement, en effet, quatre types de structure urbaine s'offrent aux villes du Sud : la ville étalée et polycentrique (Atlanta), la ville dense et monocentrique (Barcelone), la ville constituée d'un centre relativement dense entouré de villes satellites, et la ville duale formée d'un pôle moderne aux standards internationaux plus ou moins relié à une ville traditionnelle. La première question à laquelle doivent répondre les pouvoirs publics est : « quelle ville veut on ? » Etant donné que la contrainte environnementale impose la limitation de l'usage croissant de la voiture, même si l'efficacité environnementale de celle-ci est améliorée comme nous le verrons dans le chapitre 2, la première alternative, la ville étalée, est à proscrire. Dans le cadre des trois autres types de structure, construire un avenir urbain énergétiquement durable n'est en théorie pas hors d'atteinte.

Aujourd'hui, la question des consommations énergétiques liées aux transports urbains est généralement abordée selon une approche «macro-urbaine» qui se refuse à rentrer trop avant dans la complexité urbaine et par là limite son opérationnalité. Dans la lignée des recherches conduites par Newman et Kenworthy depuis une quinzaine d'années, la plupart des analyses se focalisent sur la densité moyenne et des paramètres a-spatiaux comme la répartition modale, le taux de motorisation et la richesse par habitant. Ces approches sont basées sur le modèle ASIF de l'IEA. Ces recherches

mettent en avant la forte interaction entre densités urbaines et typologies contrastées de répartition modale et de consommation d'énergie dans les transports. Leurs conclusions sont particulièrement claires mais pour autant peu opérationnelles.

En effet nous avons vu avec Fouchier notamment que l'hétérogénéité des densités au sein de l'aire urbaine a des conséquences sur la mobilité et les consommations énergétiques liées. Il s'agit donc d'analyser la structure urbaine définie par Bertaud. Les travaux de cet expert mettent en exergue les paramètres de la structure urbaine influençant les consommations énergétiques liées aux transports urbains. Il montre que la structure urbaine détermine l'efficacité des modes de transport. De l'autre coté les travaux de Schaeffer et Barter montrent comment les modes de transports dominants - et leur succession dans l'histoire d'une ville – exercent des effets structurants sur la structure urbaine.

La demande de déplacement est une demande dérivée, intermédiaire. Les besoins de déplacements naissent des besoins d'échanges des individus dans la ville et du fait de la dispersion des lieux d'activités à travers la ville. Si les structures urbaines viennent à changer, la demande de déplacement s'en trouve modifiée. Les interactions entre le développement urbain, qui détermine la structure des origines et des destinations des déplacements, et les transports jouent dans les deux sens.

Il ressort que l'évolution future des déplacements doit être envisagée en considérant les tendances socio-économiques lourdes affectant la mobilité des agents, le développement des différents réseaux de transport, mais aussi en considérant les rétroactions potentielles sur le système d'occupation des sols. Parce que ces interactions sont extrêmement complexes, la seule façon pratique d'évaluer les impacts des politiques est d'utiliser un modèle mathématique basé sur une compréhension approfondie des mécanismes à l'oeuvre. C'est l'objet des modèles interactifs de transport et de localisation (chapitre 5).

Cette revue critique de la littérature nous permet mettre en lumière l'existence d'un couple « transport –usages des sols » déterminant les trajectoires de consommations énergétiques et les émissions de CO_2 liées aux transports urbains.

A partir de l'analyse de la littérature effectuée dans ce chapitre, nous pouvons avancer que les paramètres caractéristiques du couple « transport – usage des sols » ayant une influence sur les consommations énergétiques liées au secteur des transports urbains sont :

- la taille de l'agglomération : superficie et population
- la forme géométrique
- la distribution spatiale des fonctions urbaines
- le profil et le gradient des densités urbaines
- le nombre et la distribution spatiale des centralités
- l'organisation spatiale et la capacité du réseau viaire
- la régulation par la puissance publique des forces de marché :
    - les investissements dans les infrastructures
    - les parkings
    - la fiscalité
    - la réglementation sur l'usage des sols

Nous approfondirons dans la suite de la thèse (chapitres 3, 4 et 6) l'étude de ces paramètres, leurs interrelations et leurs effets sur les consommations énergétiques liées aux transports urbains.

Chapitre 2 : Les moyens à la disposition des aménageurs urbains

Compte tenu des conclusions du premier chapitre sur les déterminants des consommations énergétiques et des émissions de CO_2 liées aux transports urbains, ce deuxième chapitre vise à une présentation critique des différents leviers d'action dont disposent les aménageurs urbains pour placer les transports dans les villes du Sud sur des trajectoires environnementalement soutenables. Il s'appuie sur une revue critique de la littérature.

La première section de ce deuxième chapitre a pour objectif de démontrer la nécessité d'une planification d'anticipation et d'accompagnement, attentive aux dynamiques spontanées de structuration urbaine et centrée sur le fonctionnement du couple « transport – usage des sols ». Pour cela, nous argumentons que la définition de la forme urbaine durable idéale est un objectif vain. La tâche prioritaire n'est pas de rechercher une forme de ville idéale mais d'encadrer une trajectoire de développement urbain, fruit de dynamiques de marchés.

Nous présentons ensuite les deux branches de la « tenaille » : les politiques de transport et d'urbanisme intégrées et complémentaires, susceptibles de maîtriser les consommations énergétiques et les émissions de CO_2 liées aux transports dans les villes du Sud.

La deuxième section discute les politiques visant à accroître la soutenabilité environnementale de l'offre de transport urbain.

La troisième section analyse les outils dont dispose une municipalité pour influencer le développement spatial d'une ville et réduire le besoin de mobilité de ses citadins.

I - Nécessité d'une planification urbaine d'anticipation et d'accompagnement centrée sur le couple « Transport – Usage des Sols »

A - *De la recherche d'une forme urbaine idéale …*

1) La forme urbaine énergétiquement idéale existe-t-elle ?

Les experts de la ville ont longtemps cherché à définir une forme urbaine durable idéale. Que la priorité soit donnée à l'un ou l'autre des trois piliers de la durabilité, différents modèles de développement urbain se sont affrontés au cours de l'histoire des théories urbanistiques. La « cité jardin » (Howard), la « ville harmonieuse » (Owen), la « cité industrielle » (Garnier), la « ville linéaire » (Soria y Mata), la « broadacre city » (Wright), la « ville radieuse » (Le Corbusier), l'organisation communautaire et pacifique avec les phalanstères de Fourier ou l'Icarie de Cabet, etc ont été proposés comme des modèles de forme urbaine idéale (Ragon, 1991).

La problématique de l'explosion des consommations énergétiques liées aux transports urbains n'échappe pas à cette tentation de définir une forme urbaine idéale minimisant les besoins énergétiques et les émissions liées aux déplacements des citadins. Les débats sur la planification d'un développement urbain économe en énergie ont été particulièrement animés durant les années 1990 et

peuvent être résumés par l'opposition entre les partisans et les opposants de la ville compacte. Le terme de « ville compacte » est utilisé dans la littérature pour réunir différentes approches de la planification urbaine insistant sur les avantages d'endiguer l'étalement urbain.

Encadré 7 : Définition de quelques concepts utilisés dans la thèse.

Refondation urbaine
Haeringer (Haeringer, 2002) utilise le concept de « refondation » pour caractériser l'ampleur et la radicalité (pratique de la table rase) des mutations que connaissent certaines des plus grandes métropoles, en onde de choc consécutive à la chute du communisme et à une ouverture brutale au libéralisme. Ces mutations se situent à l'échelle de l'agglomération et remettent en cause la ville traditionnelle ; elles sont synonymes de l'apparition d'une nouvelle façon de penser le devenir urbain.
Selon Haeringer, le séisme idéologique des années 90 et l'ouverture de l'ancien bloc communiste à la mondialisation économique et culturelle ont libéré la pulsion refondatrice longtemps contenue par l'interdit politique. Cette pulsion refondatrice se diffuse cependant hors du champ du postcommunisme, touche l'ensemble des mégapoles du monde et marque une rupture historique. Haeringer considère en effet cette « refondation urbaine » comme une nouvelle séquence de l'histoire urbaine mondiale.

Renouvellement urbain
Haeringer (Haeringer, 2002) définit le « renouvellement urbain » – par opposition à « la refondation urbaine » – comme un urbanisme doux, agissant par petites touches sur le tissu urbain déjà existant. Le renouvellement urbain ne remet pas en cause mais améliore le tissu urbain préexistant. Il désigne l'ensemble des interventions mises en œuvre dans les quartiers en crise et ayant pour objectif d'améliorer leur fonctionnement et de favoriser leur insertion dans la ville. Ces interventions empruntent plusieurs voies qui vont de la restructuration des immeubles de logements à l'amélioration de la desserte des transports et à la création de nouveaux services publics, en passant par l'implantation d'entreprises et l'accompagnement social des habitants.

Etalement urbain
L'accroissement démographique des grandes zones urbaines s'accompagne de phénomènes d'étalement des cités sur les espaces périphériques. L'étalement urbain correspond à ce que l'on désigne en anglais par « urban sprawl », expression plutôt péjorative pour désigner un mode d'expansion anarchique et peu contrôlé de la zone urbaine. L'étalement produit des formes urbaines éparpillées sous forme de mitage des espaces périphériques à la ville.
On parlera aussi, selon les cas, de périurbanisation (urbanisation continue aux franges des agglomérations), de rurbanisation (processus d'urbanisation rampante de l'espace rural par imbrication des zones urbanisées périphériques et des noyaux de l'habitat rural initial, sans tissu urbain continu), de suburbanisation (développement continu de l'espace autour des villes). (geoconfluences).

Compacité urbaine
Le concept de « ville compacte » a été formulé en réaction à l'étalement urbain. Le terme « compacte » se dit « d'un objet dont les parties sont étroitement reliées ensemble ». Appliquée à la ville, la compacité sous-entend une urbanisation continue, à l'opposé d'une diffusion urbaine dans les espaces périphériques (du type rurbanisation) (Pouyanne, 2004). Breheny (Breheny, 1995) définit la compacité comme « un raccourci pour une variété d'approches de la planification des villes qui insiste sur les mérites de l'endiguement urbain (« urban containment ») », c'est-à-dire la maîtrise de l'étalement urbain. La ville compacte est donc caractérisée par des densités élevées.

Endiguement urbain
Le concept de « l'endiguement urbain » répond à la dispersion urbaine et à l'étalement urbain. Les politiques d'endiguement de l'étalement urbain visent à concentrer l'urbanisation dans les limites urbaines existantes ; elles relèvent d'une stratégie de développement urbain compact.

D'un coté les partisans[15] de la ville compacte soutiennent qu'un haut niveau de compacité, c'est-à-dire une densité élevée, sous différentes formes, permet de réduire le nombre de déplacements en voiture et les distances parcourues. La forte densité permet de limiter la consommation de sol à travers des opérations de renouvellement urbain : réhabilitations, rénovations, requalifications urbaines. Bien que plusieurs mérites soient attribués à l'endiguement urbain – réduction des consommations de terres, préservation des habitats et paysages d'intérêt (Mc Laren, 1992 ; Council for the Protection of Rural England, 1992, 1993), renouveau économique et social des centres-villes (Bourne, 1992, Robson, 1994) – le principal objectif de cette politique est de réduire les consommations énergétiques et donc les émissions polluantes. Un faible étalement urbain rend aisé l'utilisation des transports non-motorisés et des transports en commun, et permet ainsi une plus grande mobilité mais aussi une plus grande accessibilité. La forte utilisation des transports en commun limite et remplace le trafic des véhicules privés, responsables de la congestion, de la pollution et des accidents. La proximité et la diversité des fonctions offertes permettent l'utilisation du vélo et de la marche à pied comme moyens de transport pour accéder aux fonctions urbaines.

Les études académiques soutenant la thèse que la compacité urbaine est favorable à de faibles consommations énergétiques liées aux transports urbains peuvent être classées en deux catégories : la première consiste en des examens empiriques de l'efficacité énergétique des différentes densités urbaines, à l'instar des travaux de Kenworthy et Newman discutés dans le chapitre 1 de cette thèse ; la seconde comprend des travaux théoriques basés sur des modélisations mathématiques. Représentatifs de cette dernière, signalons les travaux de Rickaby (Rickaby, Steadman, Barrett, 1992) qui s'appuie sur le modèle TRANUS[16] pour discuter les niveaux relatifs de consommation énergétique dans les transports urbains engendrés par différentes formes de croissance d'une ville stylisée de petite taille[17]. Les conclusions de Rickaby sont en faveur de deux types de croissance urbaine : une croissance concentrée dans la ville centre existante (stratégie de l'endiguement) et une croissance sous la forme d'une « concentration décentralisée » (développement de nombreux centres secondaires, tout en maintenant la densité globale) sont les deux alternatives permettant de réduire les consommations énergétiques liées aux transports urbains.

Les arguments en faveur de la ville compacte ont convaincu de nombreuses administrations d'Etat de prôner des politiques de renouvellement urbain, de préférence à la poursuite de la périurbanisation. Nous pensons à la loi française du 13 décembre 2000 « Solidarité et Renouvellement Urbains » ou à la mise en application du rapport Rogers à Londres, « Towards an Urban Renaissance », d'octobre 2000. La Commission européenne (Commission of the European Communities, 1990, 1992) encourage les villes européennes à une évolution vers plus de compacité, sur la base d'objectif environnementaux et de qualité de vie. Le gouvernement britannique a fait de la compacité urbaine un élément central de sa politique de développement durable (Department of the Environment, 1993) présenté en 1994 à la Commission des Nations Unies pour le Développement Durable. Le gouvernement néerlandais de même (National Physical Planing Agency, 1991). Même les Australiens (Newman, 1992) et les Nord-Américains (Wachs, 1990 ; Chinitz, 1990) tentent d'inverser leur tradition d'étalement urbain.

D'autres auteurs considèrent que la ville compacte n'a pas fait ses preuves. Aucune étude décisive n'a mis en lumière les coûts directs et indirects de la compacité. La concentration de plusieurs millions d'habitants et des activités économiques peut conduire à de graves problèmes de congestion, de qualité de vie et d'accès à la ville pour les plus pauvres, et ainsi contrarier les objectifs aussi bien environnementaux qu'économiques et sociaux de la durabilité. Un des chefs de file de ce mouvement d'opposition, Breheny (Breheny, 1994) s'alarme de ce que les politiques d'endiguement urbain ne

[15] Nous pouvons citer entre autres : (Haugton, Hunter, 1996), (Camagni et al, 2002), (Fouchier, 1995), (Newman, Kenworthy, 1999)

[16] Nous présenterons TRANUS en détail dans le chapitre 5 et l'utiliserons pour notre problématique dans le chapitre 6.

[17] L'échantillon utilisé par Rickaby pour construire la ville stylisée comprenait vingt villes anglaises de 50.000 à 150.000 habitants.

reposent sur aucune certitude académique et pose deux questions clefs : quelle est l'ampleur des consommations énergétiques qui résultent de la croissante décentralisation des formes urbaines ? Cette ampleur – et donc la réduction potentielle, si la décentralisation peut être contenue – est-elle suffisamment importante pour justifier l'introduction de politiques visant à renverser les puissantes forces sous-jacentes aux dynamiques urbaines ? Il conclut son étude sur l'inconsistance de ces recommandations. D'une part, le gain potentiel n'excède pas 34% des consommations actuelles d'énergie dans les transports urbains au Royaume-Uni ; d'autre part les politiques drastiques nécessaires pour inverser les tendances spontanées de décentralisation urbaine et obtenir cette réduction seraient trop coûteuses aux niveaux économique, social et culturel.

Owens (Owens, 1995), très active dans la promotion du concept de compacité urbaine, répondra que l'argument des « tendances naturelles à la décentralisation urbaine » avancé par Breheny repose sur deux hypothèses qu'il conviendrait de valider : i) ces tendances sont l'inévitable résultat des préférences individuelles ; ii) la forme urbaine qui en résulte satisfait les aspirations des individus.

Proposant une alternative à ces débats, les tenants[18] du « nouvel urbanisme » soutiennent une thèse intermédiaire : le modèle de ville polynucléaire, la « concentration décentralisée », dans laquelle les fonctions habituellement concentrées dans le centre principal sont dispersées dans plusieurs autres sous-centres, formant des noyaux reliés par des infrastructures de transports en commun performantes. Les villes fonctionneraient mieux si elles offraient des transports publics qui les relient à des banlieues à densité relativement élevée avec une occupation mixte du sol. Ainsi le renforcement du modèle « polycentrique en réseau », avec diversification des sous-centres, est l'option la plus partagée aujourd'hui.

POLYNET[19], une étude menée dans le cadre du programme ORATE[20], conclue par un appel « à se méfier du culte du polycentrisme » (Vandermotten, Roelandts, Cornut, 2005). Cette étude met en exergue le fait que là où la région métropolitaine est dominée par un seul centre majeur de niveau international, les développements dans des noyaux satellites concernent avant tout des activités qui occupent soit des niches spécialisées, par exemple la logistique autour des plates-formes aéroportuaires ou portuaires, soit des activités d'exécution plutôt que directionnelles. Ces dernières recherchent plus que jamais les concentrations au cœur des plus grandes métropoles, comme en témoigne d'ailleurs le niveau des prix immobiliers qu'elles acceptent de supporter pour les monopoliser. POLYNET montre que cette multiplication de centres satellites peut conduire à des flux croisés dans la grande région métropolitaine, flux qui ne favorisent pas nécessairement une gestion durable des transports. Il apparaît aussi que ces déconcentrations ne relèvent le plus souvent pas d'une politique concertée à l'échelle de la région métropolitaine, mais plutôt d'une concurrence entre le centre et ses périphéries, qui ne fait qu'ajouter des effets d'aubaine à des décisions déjà prises par ailleurs par les entreprises.

Nous analyserons dans la sous-section suivante une autre version de la politique de concentration décentralisée : les villes nouvelles et villes satellites.

Comme nous l'avons montré dans le chapitre 1 de cette thèse, les relations entre les formes urbaines, la mobilité et les consommations énergétiques ne sont pas directes. Fouchier (Fouchier, 1995) affirme par exemple que « la mixité dans l'espace urbain (peut) avoir autant d'effets positifs que la densification en matière de déplacements ». C'est bien la distribution spatiale des ménages et des

[18] Nous pouvons citer entre autres (Frey, 1999), (Dutton, 2001), (Beatley, 2000), (Calthorpe, 1993), (Jacobs, 1992), (Talen, 2005), (www.newurbanism.org).

[19] Sustainable Management of European Polycentric MegaCity, Regions, INTERREG IIIB NWE programme, www.espon.public.lu/fr/

[20] L'Observatoire en Réseau de l'Aménagement du Territoire Européen - ORATE - (en anglais : ESPON), crée par les ministres européens de l'aménagement du territoire, a été conçu comme un réseau d'études destiné à l'observation de l'espace communautaire européen. Après une phase-test de 1998 à 2001, le premier programme ORATE allait de 2002 à 2006. Un nouveau programme débutera en 2007 pour aller jusqu'en 2013.

activités croisée à la distribution spatiale des déplacements – la structure urbaine définie par Bertaud – qui détermine les consommations énergétiques liées aux transports urbains.

Trois enseignements peuvent toutefois être tirés de cet affrontement entre partisans et opposants de la ville compacte :

- **Le débat sur la forme urbaine durable idéale ne permet pas de trancher entre les stratégies contribuant au développement de formes compactes ou étalées, unipolaires, polycentriques ou linéaires pour maîtriser la mobilité et les consommations énergétiques et émissions de CO_2 liées.**

- Malgré tout, un message clair émerge de cette confrontation entre les partisans et les détracteurs de la ville compacte : les relations entre la forme urbaine et le système de transport sont centrales dans la recherche d'un développement urbain plus durable. Aucune stratégie de développement urbain ne livrera les avantages escomptés sans une étroite coordination avec la réalisation des infrastructures de transports.

- Enfin, **les planificateurs urbains (publics ou privés) ont besoin d'outils d'aide à la décision adaptés au contexte local et capables de quantifier les conséquences des alternatives de politiques urbaines en termes de consommation d'énergie et d'émissions de CO_2 liées** mais aussi sur les autres aspects de la durabilité urbaine.

2) Les villes nouvelles, une solution pour soulager démographiquement les mégapoles ?

La pertinence des programmes de construction de villes nouvelles[21] autour de la métropole mère constitue un sous-débat de la question précédente sur l'existence d'une forme urbaine idéale. Une ville nouvelle, satellite d'une mégapole, s'inscrit dans le prolongement du concept de « concentration décentralisée ». Par rapport à la problématique de notre thèse, la planification de villes nouvelles autour des mégapoles soulève deux questions : la ville nouvelle est-elle une solution financièrement et institutionnellement accessible aux mégapoles pauvres ? La ville nouvelle permet-elle de réduire les consommations énergétiques liées aux déplacements des citadins ?

Tout d'abord rappelons que trois raisons peuvent motiver la planification d'une ville nouvelle :

- « Organiser la région urbaine » : structurer l'expansion urbaine en créant des pôles attractifs dans l'espace péri-urbain et éviter l'étalement urbain en « tâche d'huile », formant des conurbations fortement dépendantes de l'automobile.

- « Reporter l'explosion démographique » : soulager la métropole mère d'une pression démographique estimée trop forte et reporter cette croissance démographique vers des villes nouvelles. L'idée est d'établir des villes autosuffisantes qui seraient suffisamment près de la mégapole pour profiter des aménités qu'elle offre mais suffisamment éloignée pour décourager les mouvements pendulaires quotidiens.

[21] Nous utilisons ici le terme de ville nouvelle pour désigner deux concepts qui ne sont pas *stricto sensu* identiques : les « villes nouvelles » et les « villes satellites ». Les « villes satellites », même si elles peuvent émerger d'une nécessité de disposer rapidement de grandes masses de logements, sont, pour une large part, le fruit de dynamiques spontanées. Elles se créent souvent de manière non planifiée autour de noyaux villageois à proximité de grandes métropoles (souvent en continuité avec les banlieues, à maximum 20 km). Les « villes nouvelles » désignent au contraire l'expression d'une politique d'aménagement qui vise à lier, dans un zonage strict, activités industrielles, activités de services et zones résidentielles avec un objectif de peuplement. Dans un objectif de déconcentration d'agglomération, les villes nouvelles sont souvent créées relativement plus éloignées du centre-ville de la métropole que les villes satellites (à environ 50 km). (Pelletier, Delfante, 1997). Notre propos porte donc ici sur la pertinence d'encourager la formation de « villes satellites » ou de créer des « villes nouvelles ». Nous ne prenons ici pas en considération les villes nouvelles non liées à une mégapole mère, comme par exemple Brasilia.

- « Offrir le monde » : échapper aux difficultés de renouvellement du tissu urbain traditionnel de la ville centre et construire des « espaces globalisés » offrant aux habitants et aux entreprises les standards internationaux[22].

Bien entendu, chacune de ces motivations n'exclue pas les autres.

a) La ville nouvelle est-elle une solution accessible aux mégapoles pauvres ?

La ville nouvelle est-elle une option urbanistique « plus » coûteuse ? A notre connaissance, il n'existe pas d'étude décisive permettant de répondre à cette question pourtant fondamentale. Il y a à cela de bonnes raisons : la réponse dépend tout d'abord du référentiel choisi pour cette comparaison. En effet, compare-t-on ces coûts au renouvellement urbain engendré par un choix de densification de la ville centre ou à la périurbanisation spontanée ou encore à un développement urbain canalisé le long des corridors d'infrastructures de transport de masse ? Mesure-t-on ces coûts avec un niveau d'urbanité équivalent offert aux citadins et aux entreprises ? Considère-t-on les coûts (et bénéfices) politiques ? La réponse dépend ensuite de l'objectif assigné à la ville nouvelle (techno-park ? Ville reproduisant les différentes strates de la pyramide sociales et économiques ?), des coûts considérés (investissements initiaux ? coûts de fonctionnement ? coûts fonciers ? coûts environnementaux ? etc.), de paramètres macro-économiques (quel taux d'intérêt aujourd'hui et demain ?) et enfin de la méthode d'évaluation proprement dite (quel taux d'actualisation ?).

Ainsi, **il semble vain de se poser cette question du « plus ou moins coûteux » des villes nouvelles dans l'absolu** et il apparaît en revanche plus pertinent de s'interroger sur les conditions financières et institutionnelles nécessaires pour mener à bien cette solution urbanistique. Pour cela il est intéressant d'étudier la planification des villes nouvelles de la région Ile-de-France. Une trentaine d'années après leur construction, **l'expérience des villes nouvelles franciliennes met en exergue la nécessité de disposer de ressources financières importantes et du soutien de l'Etat central sur le long terme.**

En 2005, Chomentowski, Magnard et O'Neill (Chomentowski et al., 2005) dressent un bilan détaillé des évolutions financières de cinq villes nouvelles construites autour de Paris : Cergy-Pontoise, Evry, Isle d'Abeau, Sénart et Saint-Quentin-en-Yvelines. Les villes nouvelles de la région Ile-de-France ont été confrontées au financement d'un projet tout à fait exceptionnel : accueillir 400.000 habitants. Le coût de ce projet a été très lourd pour les Syndicats d'Agglomération Nouvelle (SAN)[23]. La dette particulièrement importante qui en a découlé a nécessité une structure financière particulière que l'on retrouve dans les cinq SAN étudiés et qui se caractérise par (Chomentowski et al., 2005) :

1) Des investissements en équipement importants. Evaluer le coût des équipements supporté par les villes nouvelles pour accueillir chaque nouvel habitant est évidemment un exercice délicat, mais un ordre de grandeur peut être proposé avec un ratio divisant l'ensemble du coût des équipements réalisés par le total des nouveaux habitants. Chomentowski, Magnard et O'Neill obtiennent un ratio moyen de 8.253 euros d'équipement par nouvel habitant.

[22] Cette situation s'observe actuellement dans la plupart des grandes villes indiennes. En compétition pour attirer les délocalisations occidentales, elles se sont lancées dans de gigantesques programmes de construction de « Techno-corridors » ou « Techno-parks ».

[23] Le Syndicat d'Agglomération Nouvelle (SAN) est une structure de coopération intercommunale qui fut mise en place par la loi « Rocard » du 13 juillet 1983 pour organiser les villes nouvelles. Il remplaçait une précédente structure, le Syndicat Communautaire d'Aménagement (SCA) de ville nouvelle.

Tableau 5 : Investissements en équipement dans les villes nouvelles d'Ile-de-France

1974-2000	Population nouvelle	Equipements réalisés (1.000 €)	Coût équipement/ habitant nouveau
Cergy	118 053	815 964	6 912
Evry	60 432	448 639	7 424
IDA	25 276	278 550	11 020
Senart	67 194	543 222	8 084
SQY	119 180	1 133 446	9 510
Total	**390 135**	**3 219 821**	**8 253**

Source : Chomentowski et al., 2005.

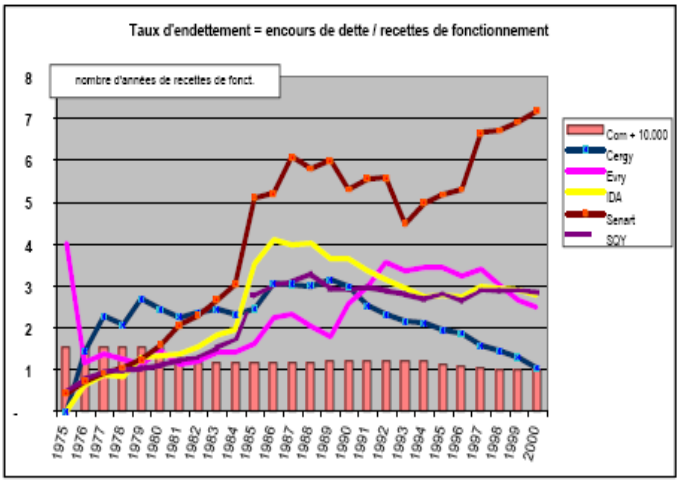
2) Des recettes de fonctionnement relativement élevées, notamment par rapport aux communautés urbaines. La fiscalité directe locale représente l'essentiel de ces recettes.

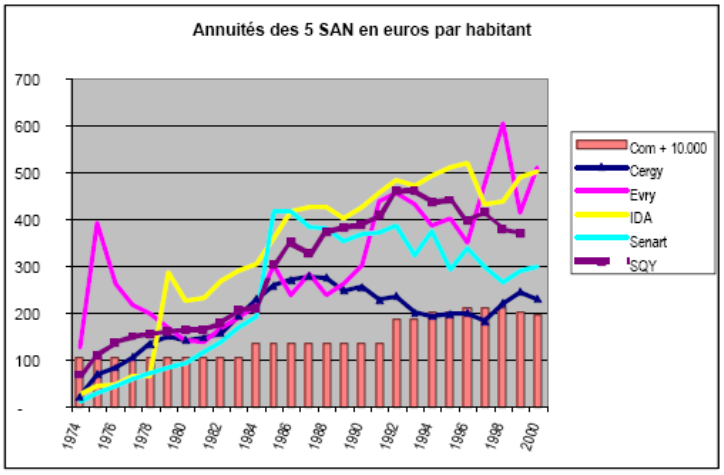
3) Des dépenses de fonctionnement assez limitées avec des dépenses de personnel faibles, mais beaucoup de transferts aux communes sur le poste de fonctionnement. Ces dépenses de transferts correspondent aux ressources que le SAN attribue à d'autres organismes (les communes de la ville nouvelle, les associations, les autres collectivités, etc.).

4) Un financement sur emprunt : les dépenses d'équipement pour l'ensemble des cinq villes nouvelles ont été financées à 85% par emprunt sur l'ensemble de la période. L'encours de dette des villes nouvelles est très élevé par rapport à la moyenne des communes françaises. Sur l'ensemble de la période, l'encours de la dette représente en moyenne trois années de recettes de fonctionnement, alors que la moyenne des communes de plus de 10.000 habitants est de l'ordre d'une année seulement.

5) Des annuités très élevées, d'abord du fait des intérêts de la dette puis du remboursement du capital. Les niveaux des annuités par habitant sont assez différents d'un SAN à l'autre, mais tous les SAN, sauf Cergy, se trouvent largement au-dessus de la moyenne des communes de plus de 10.000 habitants.

Graphe 13 : Taux d'endettement et annuités des Syndicats d'Agglomération Nouvelle d'Ile-de-France





Source : Chomentowski et al., 2005.

Le poids croissant du remboursement du capital n'a pas permis à la plupart des SAN de rembourser le capital dû en parfaite orthodoxie financière : ils ont dû emprunter à nouveau pour rembourser la dette et sont donc toujours actuellement endettés.

Chomentowski, Magnard et O'Neill montrent ainsi que le coût du développement des villes nouvelles en Ile de France a été très important, les dépenses d'équipement et la dette des SAN en

témoignent. La construction de ces villes nouvelles a nécessité un engagement de l'Etat non seulement très fort mais surtout sur une longue durée. Cet engagement de l'Etat central s'est traduit par un soutien financier direct et indirect mais aussi par la mise en place d'un ensemble d'instruments législatifs financiers et urbanistiques.

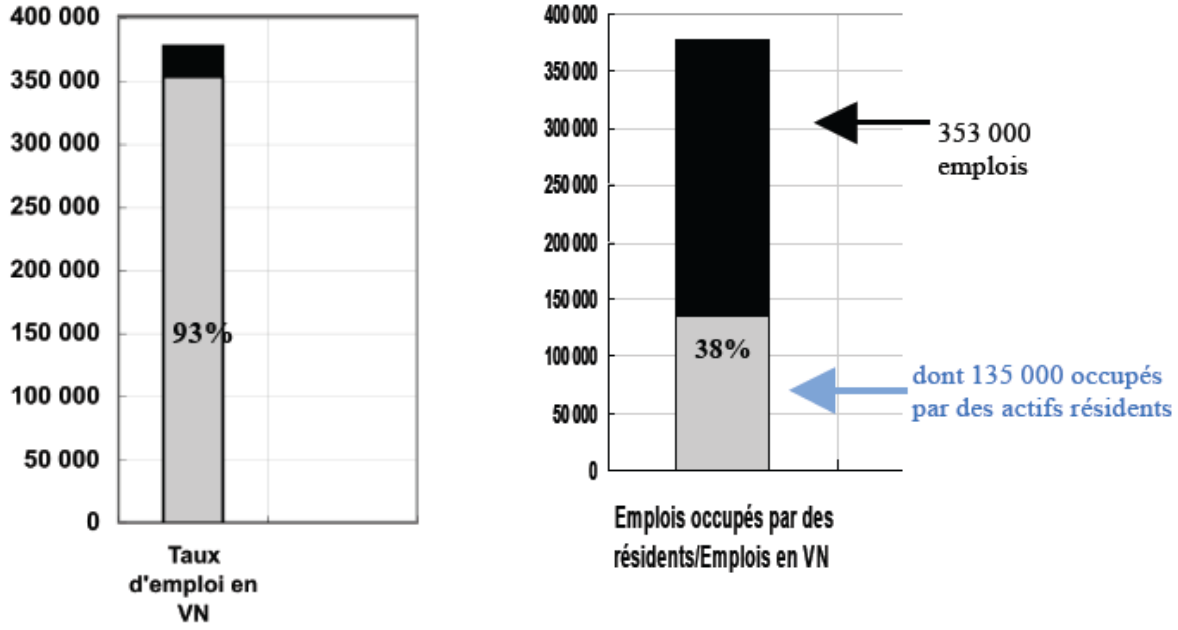
Il est donc permis de douter que cette option urbanistique soit reproductible, aujourd'hui ou demain, dans beaucoup de pays du Sud.

b) La ville nouvelle permet-elle de réduire les consommations énergétiques liées aux transports ?

L'idée que **la ville nouvelle puisse réduire les consommations énergétiques liées aux transports repose sur deux hypothèses : 1) une mobilité moindre du fait de la mixité fonctionnelle ; 2) une répartition modale en faveur des modes de transports en commun et non motorisés. L'étude des villes nouvelles franciliennes infirme ces deux hypothèses.**

Le rapport « emplois / actifs » dans les villes nouvelles de la région Ile-de-France était en 1999 de 93% (353.000 emplois pour 378.000 actifs résidents), soit un indice largement positif pour la mixité fonctionnelle. Mais au-delà de cet indice, nous devons prendre en compte la localisation résidentielle des employés occupant ces emplois dans les villes nouvelles. Ainsi, en 1999 seulement 38% des emplois (135.000 emplois parmi les 353.000) étaient occupés par des actifs résidents dans les villes nouvelles (Pernelle, Lacoste 2005). (Graphe 14)

Graphe 14 : Taux d'emploi des villes nouvelles



Source : Pernelle, Lacoste 2005.

Pernelle et Lacoste (Pernelle, Lacoste 2005) détaillent les lieux d'emploi des actifs résidant dans les villes nouvelles d'Ile de France. En 2005, 43% des actifs travaillent dans leur ville nouvelle, 21% des actifs travaillent dans leur commune de résidence et 23% en grande couronne. D'après cette enquête, quatre actifs sur dix travaillent dans leur ville nouvelle de résidence, dont deux sur dix dans leur commune.

Ainsi, malgré un rapport « emplois / actifs » proche de 1 dans les villes nouvelles, les déplacements pendulaires entre ces villes nouvelles et les autres zones urbaines de la région Ile-de-France sont importants. **Ce résultat infirme la première hypothèse selon laquelle la mixité fonctionnelle dans les villes nouvelles induit des besoins de déplacement moindres.**

Une étude (Hivert et al, 2006) menée en partenariat par le CEREN et l'INRETS établit un bilan des émissions de CO_2 par habitant et par ménage selon leur lieu de résidence en Île-de-France. **Les émissions de CO_2 liées aux transports des habitants des villes nouvelles sont supérieures de 80% à celles des habitants de Paris intra-muros et de 7% à celles des habitants des communes de la deuxième couronne** (tableau 6).

Tableau 6 : Emissions de CO_2 selon le lieu de résidence en Ile-de-France

	Densité *** (hab./km²)	Distance moyenne au centre *** (en km)	Nombre de voitures par ménages *	Evolution nombre de voitures par ménages (1982 – 1999)*	Temps de transport domicile-travail (a/r) des actifs en fonction du lieu de résidence **	Emissions de CO_2 en kg par personne liées au transport (en 1990) ***
Paris	24160	3,6	0,5	- 0,4%	66	404
1e couronne	9030	8,5	0,87	+ 20,2%	75	522
2e couronne	3630	16	1,13	+ 28,8 %	78	673
Villes nouvelles	**910**	**26,9**	**1,15**	**+ 22,6 %**	**77**	**719**
Urbain hors agglo.	385	50	1,19	+ 33,9 %	n.a.	864
Rural	60	45,3	1,44	+ 37,5 %	n.a.	1238
moyenne régionale	927	-	0,9	+ 22,7 %	72	636

Source : * Fouchier, 2002 ; ** Iaurif, 2006 ; ***Plateau, 2006.

Ainsi les émissions de CO_2 liées aux transports des habitants des villes nouvelles sont largement supérieures à celles des habitants de Paris intra-muros et de la première couronne, et même à celles des habitants de la deuxième couronne. Seuls les habitants des agglomérations isolées émettent plus de CO_2 pour leurs déplacements. **Ces résultats montrent que les villes nouvelles ne sont pas une solution satisfaisante pour réduire les consommations d'énergie et émissions de CO_2 liées aux transports urbains. Au contraire les villes nouvelles peuvent augmenter le niveau moyen des émissions CO_2 par habitant.**

Différentes raisons concourent à expliquer ces résultats. Tout d'abord, malgré un niveau de desserte « externe » (vers Paris) en transport en commun (RER, SNCF, bus en sites propres etc.) relativement satisfaisante, **le taux de motorisation** (1,15 voitures par ménage) dans les villes nouvelles est identique à celui des communes urbaines hors agglomération, soit plus du double de celui des ménages habitants Paris intra-muros. Trois caractéristiques propres aux villes nouvelles peuvent expliquer ce fort taux de motorisation (Pernelle, Lacoste, 2005) :

- l'espace offert à la voiture (largeur des rues et densité des places de stationnement) est plus important qu'à Paris ou dans la première ou deuxième couronne.
- La part de la population jeune dans la pyramide des âges des villes nouvelles est relativement plus importante que dans le reste de l'agglomération Ile de France ; il y a peu de retraités.
- les bassins d'emploi développés en périphérie des villes nouvelles ne bénéficient pas d'une bonne desserte en transports en commun, notamment aux heures de pointe ;

Ensuite la mobilité des habitants des villes nouvelles se caractérise par des distances déplacements plus longues (29 km en moyenne contre 16 km pour les habitants de Paris intra-muros, 19 et 25 km pour les habitants des banlieues intérieures et extérieures) et des temps de déplacements plus longs (77 minutes pour les habitants des villes nouvelles contre 66 pour les habitants de Paris), deux éléments qui poussent les habitants à préférer la voiture aux transports en commun (59% des actifs se déplacent en véhicule particulier). En effet, la voiture offre la vitesse suffisante pour compenser les distances plus grandes des parcours et permet donc aux habitants des villes nouvelles de passer un temps relativement équivalent dans les transports à celui des autres habitants de l'Ile-de-France.

Tableau 7 : Caractéristiques de la mobilité de franciliens selon leur lieu de résidence et émissions de CO_2

Zone IAURIF de résidence *	Répartition population francilienne** en %	Distance parcourue en km	Répartition par mode de transport en % des distances parcourues				Émissions de CO_2 en gramme
			Véhicule particulier		Transport collectif	Marche, vélo	
			chauffeur	passager			
Jour de semaine ordinaire							
Paris	18	16	29	7	55	9	1 177
Banlieue intérieure	27	19	39	9	45	7	1 685
Banlieue extérieure urbanisée	26	25	43	10	43	5	2 236
Franges de l'agglomération	8	29	49	9	38	4	2 726
Villes nouvelles	7	29	44	11	41	5	2 421
Agglomérations secondaires axes et vallées	8	33	43	9	44	4	2 599
Agglomérations secondaires isolées	3	37	51	13	32	4	3 256
Communes rurales	4	37	60	14	23	3	3 883
Samedi							
Paris	18	20	49	24	27	0	1 767
Banlieue intérieure	27	20	54	29	16	1	1 917
Banlieue extérieure urbanisée	26	23	53	32	13	1	2 134
Franges de l'agglomération	8	28	57	35	8	0	2 650
Villes nouvelles	7	30	49	38	11	3	2 583
Agglomérations secondaires axes et vallées	8	28	62	32	6	0	2 828
Agglomérations secondaires isolées	3	29	58	31	7	3	2 853
Communes rurales	4	60	55	38	5	2	5 514
Dimanche							
Paris	18	17	47	34	19	1	1 561
Banlieue intérieure	27	16	51	35	13	1	1 559
Banlieue extérieure urbanisée	26	21	54	39	6	1	2 006
Franges de l'agglomération	8	16	54	39	6	1	1 565
Villes nouvelles	7	20	46	42	11	2	1 690
Agglomérations secondaires axes et vallées	8	24	47	50	3	0	2 032
Agglomérations secondaires isolées	3	26	50	42	8	0	2 363
Communes rurales	4	36	51	46	0	3	3 251

** zones IAURIF : voir encadré et carte*
*** l'Île-de-France comptait 10,655 millions d'habitants en 1990*
Source : enquête globale transport (EGT) 91, estimation Inrets 2005

Tableau 8 : Temps de déplacements aller et revenir du travail

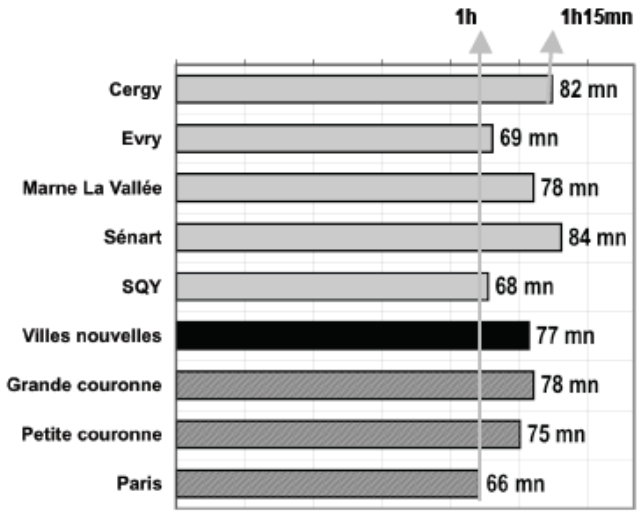


Tableau 9 : Modes de transport des actifs selon leur lieu de résidence

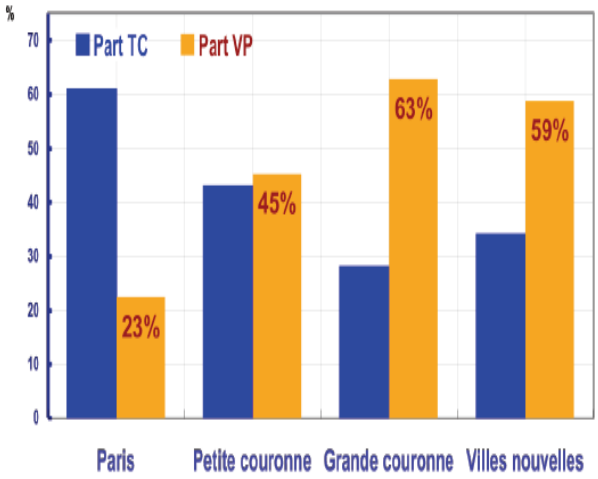
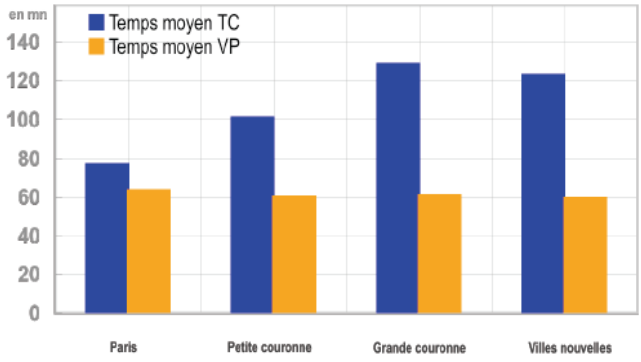


Tableau 10 : Temps de déplacement des actifs selon leur lieu de résidences et leur mode de transport



Source : Pernelle, Lacoste, 2005

Enfin, faute d'une desserte en transport en commun fiable, régulière et sécurisée, les sorties le soir des habitants des villes nouvelles s'effectuent principalement en voiture : plus de huit sorties sur dix s'effectuent grâce à un moyen de transport individuel motorisé. Seul un habitant sur dix utilise les transports en commun. (Pernelle, Lacoste, 2005).

Ainsi **la construction de villes nouvelles ne semble pas être une solution soutenable pour soulager les mégapoles pauvres de la pression démographique.** D'une part il est peu probable que les mégapoles du Sud disposent des ressources financières suffisantes et du soutien étatique sur le long terme pour supporter les investissements nécessaires. D'autre part, l'exemple des villes nouvelles franciliennes – qui, elles, ont bénéficié de ce soutien financier et institutionnel – montre que les politiques de construction de villes nouvelles ne semblent pas être une solution satisfaisante pour réduire les consommations d'énergie et émissions de CO_2. Au contraire, les villes nouvelles de l'agglomération parisienne augmentent le niveau moyen des émissions CO_2 par habitant liées aux transports urbains.

Les villes nouvelles, construites dans le cadre d'une « concentration décentralisée » du développement urbain, ne garantissent donc pas la réduction des consommations énergétiques liées aux déplacements urbains, au contraire elles peuvent les augmenter. Ce résultat confirme le caractère vain de la recherche d'une forme urbaine énergétiquement idéale.

B - *… à un urbanisme d'anticipation et d'accompagnement du développement urbain*

Depuis plusieurs décennies, la conviction s'est progressivement enracinée chez la plupart des experts que **les forces du marché sont tellement puissantes en matière d'usage des sols, qu'il est non seulement très difficile, mais inefficace, pour la puissance publique, de s'y opposer frontalement**. Renard (Renard, 2003) insiste sur l'importance des mécanismes économiques dans les formes de développement urbain, et sur leur faible maîtrise par les collectivités publiques. Cet auteur met en exergue la « dictature des marchés foncier et immobilier » sur les choix politiques. Un consensus s'est ainsi formé, qui déclare la fin de l'urbanisme traditionnel à l'européenne (« la fin des démiurges », Haeringer, 2000), fondé sur une planification détaillée préalable, une intervention massive des collectivités publiques sur le foncier et des financements spéciaux pour la construction. Les conditions économiques d'ensemble (redéfinition des frontières entre Etats et marchés) d'une part, et les ressources financières très limitées des collectivités publiques, particulièrement dans les pays émergents, pour intervenir directement sur un foncier dont les prix augmentent vite par ailleurs voire connaissent des bulles spéculatives dans beaucoup de « cités globales » d'autre part, font qu'**à**

l'urbanisme des « démiurges » succède un urbanisme « d'anticipation et d'accompagnement », par définition plus attentif aux dynamiques spontanées.

Nous rejoignons ici, en partie, ce que Tribillon (Tribillon, 2002) appelle « faute de mieux le réal-urbanisme[24] ». Analysant les évolutions doctrinales de l'urbanisme, Tribillon constate à la fin du 20ème siècle « l'adhésion quasi unanime des praticiens et des instituts de formations » à une nouvelle doctrine non énoncée comme telle (par opposition à la charte d'Athènes) : « l'urbanisme n'a plus mission de modifier la structure urbaine ». Selon Tribillon, le premier temps de cette évolution est marqué, au début des années soixante, par la généralisation d'une planification urbaine consistant à programmer les composants urbains (eau, électricité, ordures, établissements d'enseignements, aéroports, CBD, etc.). Ce travail de programmation, à la différence de la « normalisation abrupte de l'urbanisme moderne », s'appuie sur des études fines des comportements sociaux et des évolutions économiques. « Cette planification s'efforce de dire que la ville est un contenant qui doit être défini plus finement par le contenu ». Le « réal-urbanisme » est pour Tribillon « l'aboutissement de la planification qui s'attacherait à gérer et à moderniser la *ville telle qu'elle est* ». « Ce réal-urbanisme abandonne tout volontarisme et renonce à construire l'unité de la ville.[…] Il cantonne ses ambitions planistes et volontaristes aux grands travaux de circulation et de transports qui ont pour objet de doter [l'agglomération] d'une unité circulatoire minimale, requise d'une part, par l'organisation de l'espace urbain comme espace économique susceptible d'être investi, en tous points, par des entreprises, et d'autre part, par l'organisation de l'espace urbain, comme espace social ». L'idée de Tribillon est qu'une large autonomie doit être laissée aux grands acteurs et opérateurs urbains qui font de la promotion foncière et immobilière. « Le technicien qui pense l'urbanisme et le notable ou l'élu qui prend les décisions sont en face d'un troisième partenaire : l'opérateur qui, lui, fait la ville, donne un contenu réel, concret à l'urbanisme ».

Cela implique de décrypter les modèles par lesquels les majorités urbaines produisent et reproduisent leur espace de vie. Les marchés fonciers et immobiliers, formels et informels, envoient des signaux, reflets de la dynamique de structuration urbaine, que le législateur doit prendre en compte. Il s'agit donc d'abord de mieux comprendre, dans une ville donnée puisque le contexte local est essentiel, les phénomènes d'intensification – concentration et d'extension – et de dilution des formes urbaines, et les effets de l'amélioration de l'accessibilité par des TRM dans la création de nouvelles polarités, bref de comprendre les facteurs déterminant la localisation des ménages et des activités. Sur le plan pratique, les interventions publiques sont conçues pour accompagner les modèles majoritaires de production de l'urbain, et si possible les améliorer.

Finalement, la tâche prioritaire n'est donc pas de concevoir une forme de ville idéale mais, plus modestement, de reconcevoir les formes de villes existantes et donc d'anticiper et d'accompagner, c'est-à-dire d'encadrer le développement urbain spontané. Plutôt que de chercher un modèle statique d'une forme urbaine durable, il est nécessaire d'identifier les chemins complexes à travers lesquels des formes urbaines différentes en lien avec des infrastructures pourront revendiquer leur durabilité. Il faut considérer les liens entre densité, mixité fonctionnelle et sociale, formes urbaines et mobilité afin de stimuler et favoriser, par des politiques coordonnées d'urbanisme et de déplacements, des dynamiques spatiales générant des modalités de mobilité durables.

C - *Une politique urbaine agissant sur le couple « transport – usage des sols »*

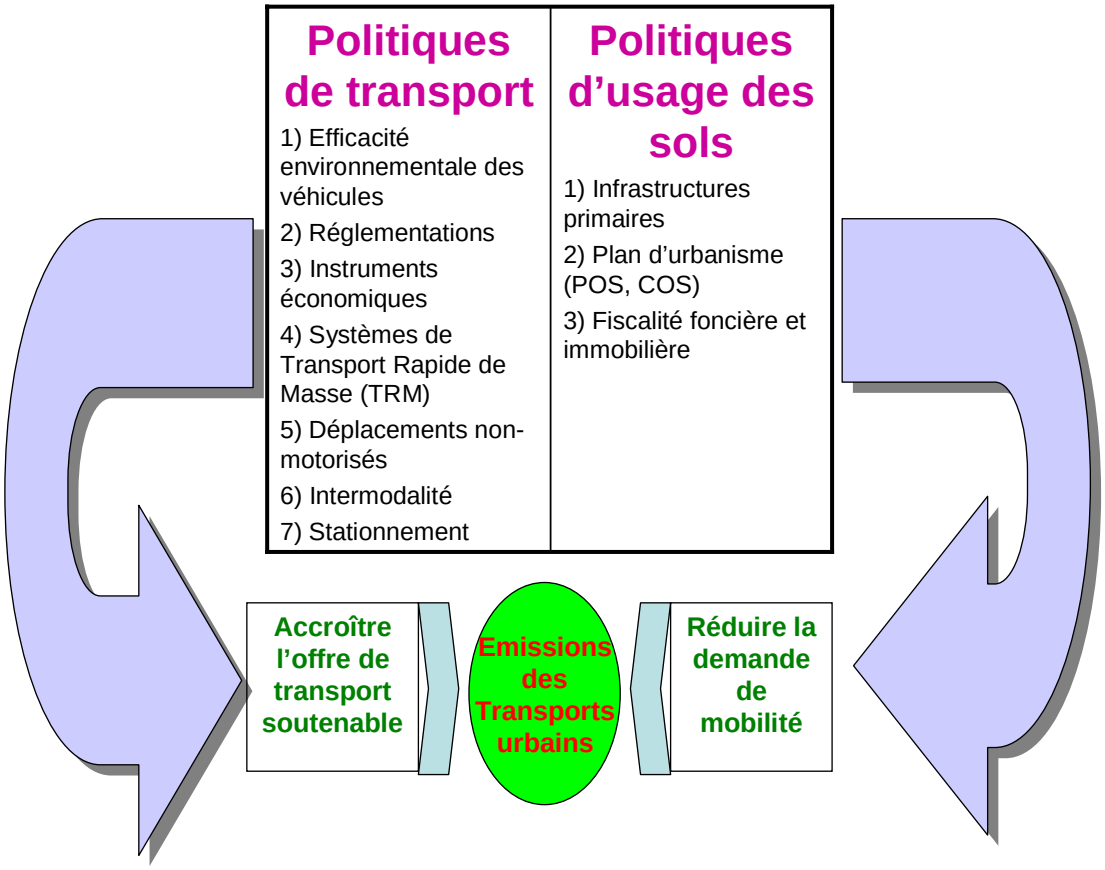
Nous avons vu dans le chapitre 1 que le couple « transport – usage des sols » est au cœur des dynamiques urbaines et donc des trajectoires de consommations énergétiques et émissions de CO_2 liées aux transports urbains. **C'est donc le fonctionnement spontané de ce couple que les politiques urbaines se doivent d'anticiper, d'accompagner et d'encadrer pour placer les villes sur des trajectoires environnementalement soutenables.**

[24] Tribillon choisit ce terme pour transposer le néologisme allemand de *Realpolitik* au sens de « politique internationale fondée sur des considérations de rapports de force et de possibilités concrètes » selon le dictionnaire Robert (Tribillon, 2002).

Il s'agit de mettre en place une planification urbaine intégrant explicitement les interactions entre le système de transports et le système d'usage des sols. Ces interactions, de même que celles entre les différents modes de transports, sont complexes. C'est sans doute ce qui explique que les planificateurs urbains tendent à séparer et à simplifier les problèmes, traitant partie par partie le système dont ils ont la gestion. Une façon d'évaluer les impacts des politiques intégrées « transports – usage des sols » est d'utiliser des modèles de simulation des dynamiques urbaines basés sur une compréhension approfondie des mécanismes de choix de localisations et de transports[25].

Même s'il reste beaucoup à faire pour comprendre les interactions entre ces politiques[26], il est possible, sur la base de la littérature, de tracer les grandes lignes des combinaisons politiques de transport et de politique d'usage des sols qui sont requises pour infléchir significativement les tendances inquiétantes des évolutions en cours. Elles sont résumées dans la Graphe 15 qui décrit la « tenaille » des politiques complémentaires susceptibles de maîtriser les émissions du transport dans les villes émergentes.

Graphe 15 : La « tenaille » des politiques de réductions des émissions des transports urbains



source : Elaboration par l'auteur

[25] Le chapitre 5 sera consacré à l'étude des modèles « transport – usages des sols » existants et adaptés à l'étude des consommations énergétiques liées aux transports urbains.

[26] Les chapitres 3 et 4 s'attacheront à mieux expliciter les relations entre l'offre de transports et les usages des sols à partir de l'étude d'un cas concret : l'introduction d'un Bus Rapid Transit à Bogota (Colombie). Le chapitre 6 sera consacré à l'analyse de l'efficacité de différentes combinaisons de politiques intégrées « transport – urbanisme » pour infléchir les trajectoires de consommation énergétique.

D - *Présentation des deux branches de la tenaille*

Nous soutenons donc la thèse d'une nécessaire **« prise en tenaille » des consommations énergétiques liées aux transports urbains** par des politiques de transport et d'urbanisme intégrées et complémentaires. Cette tenaille vise d'un coté à accroître l'offre de transport soutenable et de l'autre coté à réduire la demande de mobilité.

Les politiques visant à accroître la soutenabilité environnementale de l'offre de transport urbain recouvrent un ensemble de mesures pratiques que sont :

1) L'amélioration de l'efficacité environnementale des véhicules, c'est-à-dire

- Améliorer le rendement énergétique des véhicules (allégement des véhicules, aérodynamisme, réduction des frottements moteurs, isolation thermique) ;
- Améliorer la qualité environnementale des carburants consommés en minimisant les effets négatifs sur l'environnement des carburants fossiles existants (plomb et sulfure) et en leur substituant des carburants fossiles moins polluants (CNG et LPG), des biocarburants (bioéthanol, biodiesel, méthanol) et d'autres sources d'énergie (électrique et hydrogène) ;

2) La mise en place d'un ensemble de réglementations pour inciter les constructeurs de véhicules à utiliser les progrès technologiques favorables à l'environnement ;

3) La mise en place d'un ensemble d'instruments économiques, agissant sur les prix pour soutenir et compléter les autres mesures, fondées sur la réglementation et l'offre d'infrastructures, de manière à dissuader l'usage des véhicules les plus polluants.

4) L'action sur le choix modal au travers de l'offre de moyens de transports collectifs peu polluants, rapides, confortables (pour que même les propriétaires d'automobiles puissent les choisir) et néanmoins bon marché (pour que la ville soit accessible aux pauvres) ;

5) La promotion des déplacements non motorisés par un « design » urbain approprié ;

6) L'articulation des divers modes de transport pour faciliter l'intermodalité ;

7) La gestion de l'espace offert aux différents modes de transport, notamment des places de stationnement.

Notons que les actions concernant l'efficacité environnementale du parc de véhicules existants et à venir visent à réduire l'intensité énergétique des véhicules et les émissions par quantité de combustible consommé, c'est-à-dire les variables *F* et *I* de l'approche *ASIF* proposée par l'IEA (Schipper, 2002) et présentée en introduction du chapitre 1. L'offre d'infrastructures et de systèmes de transports en commun, la promotion des déplacements non-motorisés et l'articulation efficace des divers modes de transport visent à réduire la part modale de la voiture dans les déplacements, c'est-à-dire intervient sur la variable *S* de l'équation *ASIF*.

Les politiques visant à réduire la demande de mobilité recouvrent un ensemble de mesures pratiques qui sont :

1) Le développement des infrastructures primaires dans les zones où l'on souhaite voir s'intensifier l'urbanisation ;

2) L'adaptation des règles d'urbanisme, notamment les Plan d'Occupation des Sols (POS) et Coefficient d'Occupation des Sols (COS) ;

3) L'emploi des effets incitatifs de la fiscalité foncière et immobilière qui permet d'orienter l'utilisation des terrains en vue de minimiser les besoins de mobilité.

Ces trois leviers d'action doivent être articulés, ensemble et avec le système de transports, en vue de faciliter la concentration des investissements privés dans les zones de forte accessibilité engendrées par la construction d'un Transport Rapide de Masse (TRM) afin de diminuer le besoin de mobilité grâce à une densité et une mixité des fonctions plus forte.

La réduction des besoins de déplacement par une politique d'urbanisme et en particulier d'usage des sols vise à réduire *A* de l'approche *ASIF*.

Au travers de cette tenaille, il s'agit de réduire la demande de mobilité tout en améliorant l'accessibilité aux aménités offertes par la ville et de rendre cette mobilité peu polluante. La politique urbaine menée à Curitiba (Brésil) dans les années 1970 illustre bien cette approche (cf. encadré 8).

La présentation de cette « boîte à outil » à la disposition des planificateurs urbains fera l'objet des sections suivants de ce chapitre (II et III).

Encadré 8 : La politique intégrée « transport – urbanisme » de Curitiba (Brésil).

Curitiba, capitale de 2 millions d'habitants de l'Etat du Paraná au Brésil, est certainement un des exemples les plus spectaculaires de développement conjoint de fortes densités urbaines et d'axes de transport public à haute performance.
En 1974, la municipalité prend l'initiative d'une politique de transport en commun volontariste pour relever le défi de son urbanisation rapide : la construction d'un Bus Rapid Transit (BRT). Après avoir longtemps hésité entre un métro et un système basé sur le bus, Curitiba opta pour un BRT beaucoup moins cher mais doté de tous les avantages du métro : sites propres sur les artères principales, temps d'attente limité à 2 minutes, bus bi-articulés extra-longs (270 passagers) pilotés par un seul employé, facilités pour les moins-valides, réseau en étoile interconnecté avec des routes circulaires. Etendu de 12 à 65 km en vingt-cinq ans, ce système de lignes de Bus Rapid Transit (BRT) sert d'ossature à 350 km de lignes de rabattement et près de 200 km de lignes inter-quartiers.
La municipalité a tracé les parcours, choisi les véhicules, décidé des tarifs et installé les stations (des arrêts existent aussi dans les favelas). Mais ce sont des sociétés privées qui ont acheté les bus, engagé les chauffeurs et font fonctionner le réseau.
Ce système BRT a été développé en tant que composante essentielle du plan d'urbanisme de 1974 dont les objectifs étaient d'orienter l'expansion urbaine de manière radiale, le long des cinq corridors BRT et de protéger le centre ville traditionnel. L'enjeu était de relever le défi posé par un taux de croissance démographique annuelle de 4% durant les années 1960 et 1970. Les approches classiques d'urbanisme étaient mises en échec. Le plan d'urbanisme proposé en 1974 suivait les principes d'une intégration « transport – urbanisme » : promotion d'une croissance urbaine linéaire par intégration des transports publics, du réseau viaire et de la réglementation de l'usage des sols le long des « axes structurants », les corridors BRT. La voie médiane en site propre pour les bus BRT est au centre d'un système ternaire de voirie hiérarchisée (corridor pour les bus, rue locale et artère à une voie). Les densités du développement urbain sont plus importantes au sein de ce système ternaire que dans d'autres zones de la ville. Dans les deux blocs de part et d'autre du couloir BRT, l'usage des sols est mixte « commercial – résidentiel » ; au-delà de ces deux blocs, les terrains sont réservés aux usages résidentiels. L'usage des sols dans ces zones est le fruit d'une combinaison de contrôle strict et d'incitation : bonus fiscal, marché de transfert de droits à construire, contrôle de l'importance des surfaces commerciales développées (les centre commerciaux ne peuvent excéder un certaine surface). L'usage des sols en périphérie de la ville est fortement contrôlé. La circulation motorisée en centre ville est découragée par une politique de parking adaptée, ce qui incite à l'usage du BRT.
Les résultats sont impressionnants. Bien qu'ayant le second plus haut taux de motorisation du Brésil (400 voitures/1000 habitants), 72% des déplacements domicile-travail s'effectuent par bus. De plus, 1,8 millions de passagers sont transportés par jour (80% des déplacements sont effectués en bus alors que 28% des usagers des bus possèdent leur propre voiture), et l'on constate 30% de pollution aérienne en moins. La densification du développement urbain le long des corridors est nettement plus importante que dans le reste de la ville (cf. Photos 2 et 3).

Carte 2 : Plan du système BRT

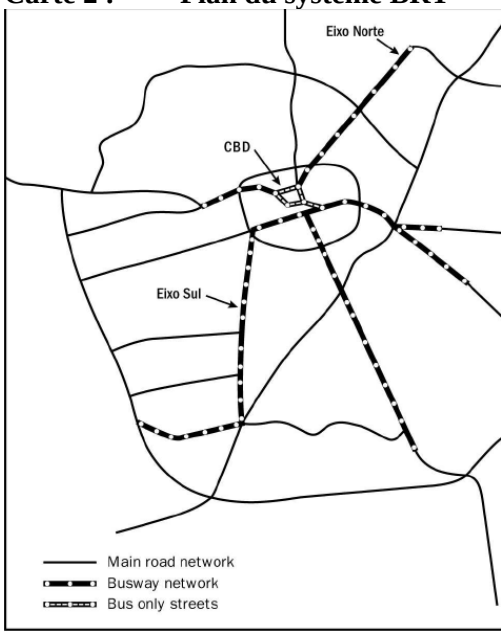


Photo 1 : Bus bi-articulé (Curitiba)



Graphe 16 : Schéma des axes structurants BRT (Curitiba)

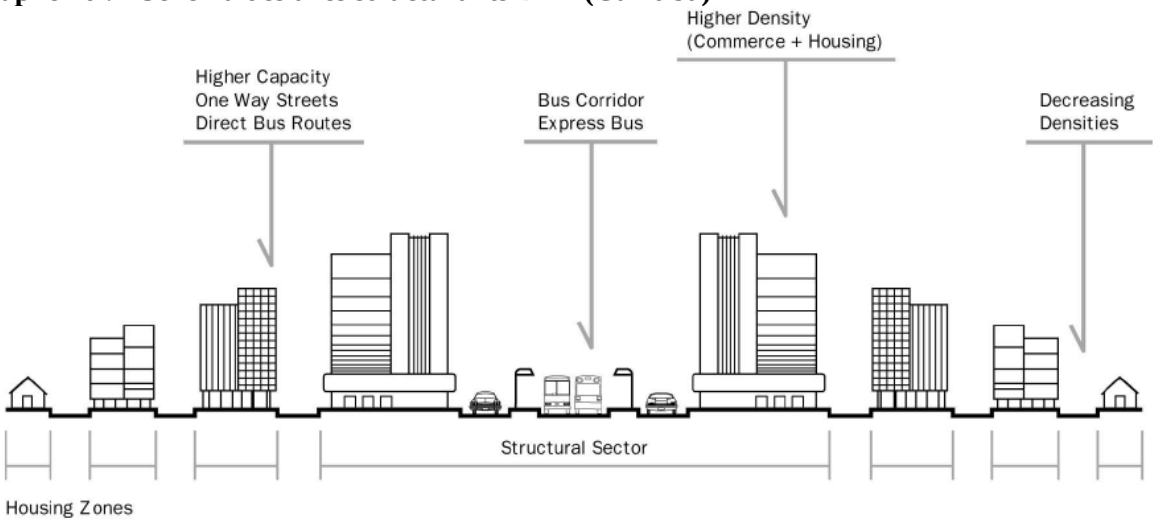


Photo 2 : Corridor BRT (Curitiba)



Photo 3 : Développement urbain le long des corridors BRT (Curitiba)



Source : IPPUC ; Rabinovitch, Hoehn, 1993 ; Cervero, 1995.

Parallèlement au transport public, Curitiba a réalisé de nombreuses zones piétonnes en centre-ville. On compte aussi 135 km de pistes cyclables. L'intégration de la gestion de la circulation, des transports de masse et de l'usage des sols a permis à la ville de minimiser la circulation, d'aménager des zones de loisirs et des zones piétonnières dans le centre-ville, et de favoriser l'utilisation des transports en commun et des vélos. En juin 1996, au deuxième sommet mondial des maires et urbanistes qui s'est tenu à Istanbul, Curitiba a été récompensée comme la cité la plus innovante au monde. Le système de transport a également été récompensé par l'English Building and Social Housing Foundation (EBSHF). Ce système a été repris avec succès par d'autres villes du Sud comme Bogota (TransMilenio), Manille, Mexico, Beijing mais aussi du Nord comme Boston, Adelaide et Miami.

II - Les politiques visant à accroître la soutenabilité environnementale de l'offre de transport urbain

Nous discutons dans cette section les politiques visant à accroître la soutenabilité environnementale de l'offre de transport urbain. En allant du plus superficiel au plus profond des déterminants des émissions liées aux déplacements urbains, nous étudions les mesures pratiques pour améliorer l'efficacité environnementale des véhicules (les mesures « *end of pipe* », la réglementation et les instruments économiques) et les politiques intervenant sur la répartition modale des déplacements (la promotion des Transports Rapides de Masse (TRM) et des déplacements non-motorisés, l'intermodalité facilitée et l'espace offert aux différents modes de transport).

A - *Améliorer l'efficacité environnementale des véhicules*

1) Améliorer le rendement énergétique des véhicules

Les mesures pour améliorer le rendement énergétique des véhicules sont de trois types (Cabal, Gatignol, 2004) :

- **L'allègement** : des alliages d'aluminium offrent des réductions de poids de la carrosserie allant jusqu'à 45%. Cependant l'aluminium reste un matériau cher et difficile à travailler. Il ne concernera au mieux que le haut de gamme du parc automobile. Des recherches sont aussi en cours sur l'utilisation du magnésium, 36% plus léger que l'aluminium. Son utilisation pose cependant encore de nombreux problèmes de corrosion et d'abrasion (Cabal, Gatignol, 2004).

- **La réduction des frottements :** les frottements dans les moteurs représentent 41% des pertes énergétiques. Les efforts actuels portent sur un revêtement des pistons avec des couches microscopiques de métaux ou d'alliages présentant moins de résistance au frottement que l'aluminium.

- **L'isolation thermique :** la climatisation représente entre 12 et 43% de la consommation totale soit 0,7 à 4 litres au 100 km. Des recherches menées à l'université de Berkeley ont démontré que l'insertion de nouvelles technologies dans une Ford Taurus pouvait réduire le besoin de refroidissement de 75% et celui de chauffage de 85%.

Malgré les potentiels d'économie d'énergie, le marché des voitures neuves témoigne d'une tendance inverse. Les modèles de grande taille et de grosse cylindrée gagnent des parts de marché au détriment des petites citadines. La puissance moyenne (en kW) a augmenté de 38% en France depuis 1984. De plus, des mesures maximisant la sécurité (feux en plein jour, résistance au choc, etc.), l'acoustique et le confort augmentent le poids des véhicules. En France, par exemple, le poids moyen croît de 15 kg par an depuis 1984, et il faut savoir que 10 kg supplémentaires entraînent une augmentation des émissions de gaz à effet de serre (GES) de 0,9 g CO_2/km (Cabal, Gatignol, 2004).

2) Améliorer la qualité environnementale des carburants

a) Améliorer la qualité des carburants existants

Les carburants utilisés actuellement sont des distillats de pétrole. Ce sont essentiellement l'essence et le gazole qui constituent les deux carburants principaux dans le secteur des transports[27]. Dans les pays du Sud, la qualité des carburants reste médiocre. De plus, l'essence y est souvent mélangée avec du kérosène, moins cher, et le gazole avec du pétrole brut et de l'huile à moteur (GTZ, 2004).

La diésélisation du parc automobile en France est pour certains experts un exemple à suivre. Aujourd'hui la motorisation diesel est la solution la moins onéreuse pour réduire les émissions de CO_2 à 149 g/km, au lieu de 162 g/km pour un moteur à essence. Avec les 69,1% des diesels actuels en France, ce sont 292.514 tonnes de CO_2 évitées par an. Selon le Comité des Constructeurs Français d'Automobiles (CCFA), la diésélisation totale du parc européen permettrait d'économiser 50 MteCO_2, celle du parc américain à 30% permettrait d'éviter 135 MteCO_2, soit l'équivalent des émissions engendrées par le trafic routier en France. (Cabal, Gatignol, 2004).

b) Substituer par des carburants fossiles moins polluants

Le **gaz naturel (CNG[28])** n'est pas une énergie renouvelable mais conduit à une réduction de 15-20% des émissions de CO_2 par rapport au pétrole en raison de la moindre teneur en carbone (-25%). Les barrières à son utilisation sont le coût de la conversion d'un moteur conventionnel, l'autonomie limitée (environ 400 km avec un réservoir plein), l'augmentation du poids du véhicule (en raison de réservoirs additionnels) et les problèmes de stockage, pour l'usager comme pour le fournisseur. Des investissements importants sont nécessaires pour construire un réseau de distribution.

Près de 4 millions de véhicules circulent au CNG dans le monde. Certains pays ont opté de manière assez radicale pour cette filière. C'est le cas de l'Argentine avec 1,3 millions de véhicules et de l'Inde qui comptait en 2002 11.400 bus et minibus, 15.000 taxis, 10.350 voitures particulières et 45.000 véhicules à trois roues roulant au gaz naturel (GTZ, 2002).

Le **gaz de pétrole liquéfié (LPG[29])** présente des caractéristiques similaires au CNG, si ce n'est que la réduction des émissions de CO_2 est moindre (entre 7% et 20%[30]). Le LPG est un produit dérivé obtenu lors du raffinage du pétrole. Aujourd'hui son offre est supérieure à sa demande et donc son prix relativement bas, mais à long terme, son offre restera limitée. Les autres barrières à son utilisation sont la nécessité d'un dispositif de sécurité pour le réservoir pressurisé, le coût des modifications nécessaires sur les moteurs conventionnels (sa transformation en un moteur « *flex-fuel »)* et sa faible autonomie. (Ademe 2007).

c) Substituer par des biocarburants

Le **biodiesel** (EMHV[31]) réduit de 75% les émissions de CO_2 en comparaison avec le diesel conventionnel (Quirin et al., 2004). Son coût élevé est l'une des principales barrières à son utilisation extensive. Une réduction de son coût sur le long terme n'est pas attendue. De même que le diesel conventionnel, il pose des problèmes d'émissions de particules.

---

[27] Le parc automobile français est par exemple composé de 30,1% de véhicules à essence et de 69,1% au gazole (Cabal, Gatignol, 2004)

[28] « Compressed Natural Gas »

[29] « Liquefied Petroleum Gas »

[30] 125 et 140 g CO_2/km pour le LPG au lieu d'environ 150 g CO_2/km pour l'essence

[31] Ester Méthylique d'Huile Végétale

Tableau 11 : Coûts avant taxes du biodiesel et du diesel, 2003

Fuel type	Source	Country	Production costs (US$/l diesel equivalent)
Biodiesel	rape seed	Europe	0.35–0.80
	soy beans	USA	0.48–0.73
Diesel	crude oil		0.20–0.24

Note: The volumetric energy content of biodiesel is a few per cent less than in the case of diesel. To compare, the costs per litre are therefore transferred into diesel equivalents.

Source : Assmann, Sieber, 2005

Le **méthanol** peut être produit à partir de méthane, de bois ou de cellulose. Par conséquent, ses performances environnementales dépendent fortement de sa source de production. S'il est produit à partir de biomasse, il permet de réduire de 60% les émissions de CO_2 en comparaison avec l'essence. S'il est produit à partir de méthane, les émissions de CO_2 ne seront que légèrement réduites par rapport à l'essence. Les experts estiment qu'il est peu probable que le méthanol devienne compétitif économiquement avec les carburants conventionnels (GTZ, 2002).

L'**éthanol** est le biocarburant le plus utilisé au monde. Il est produit par fermentation de sucre ou d'amidon issus soit de plantes sucrières (cannes à sucre, betterave) soit de plantes amylacées (blé, maïs, etc.). Cet alcool peut être mélangé à l'essence jusqu'à 5% en volume, sans modification technique des moteurs à essence, et jusqu'à 15% s'il est transformé en ETBE (éthyl tertio butyl éther). Il peut également être utilisé jusqu'à 85% (E85) dans des véhicules « *flex-fuel* » (Ademe, 2007). Le **coût** de production est très dépendant du prix de la matière première qui représente 50 à 90% du coût final.

Tableau 12 : Coûts avant taxes de l'éthanol et de l'essence, 2003

Fuel type	Source	Country	Production costs (US$/l petrol equivalent)
Ethanol	corn	USA	0.43
	sugar-beet	Europe	0.63–0.90
	wheat	Europe	0.53–0.93
	sugar cane	Brazil	0.20–0.30
Petrol	crude oil		0.26–0.28

Note: The volumetric energy content of ethanol is one-third less than in the case of petrol. To compare, the costs per litre are therefore transferred into petrol equivalents.

Source : Assmann, Sieber, 2005

En 2005, la consommation de l'éthanol était dix fois plus importante que celle du biodiesel : 30 millions de tonnes (Mt) ont été vendues (dont 80% utilisées en tant que carburant) contre seulement 4 Mt de biodiesel. Au Brésil, où l'éthanol est soutenu par une déduction fiscale, l'E85 représente 35% de parts de marché. Les prix de production de l'éthanol sont du même ordre de grandeur que ceux de l'essence, ce qui n'est pas encore le cas en Europe ou aux Etats-Unis.

Le développement de la **filière Biocarburant de deuxième génération** (« Biomass to Liquid » (Btl)) tente d'utiliser la biomasse ligno-cellulosique dont les réserves sont immenses : 13,5 milliards de tonnes de biomasse pourraient être mobilisées, correspondant à 6 milliards de tonnes équivalent

pétrole (tep), soit près de 50% de la consommation mondiale d'énergie. Le développement de cette nouvelle filière est donc un enjeu important (IFP, 2007).

Les bilans ACV[32] présentés dans le tableau 13 sont issus de deux études différentes. L'étude européenne a été réalisée en 2004 et mise à jour en mai 2006 par le Centre Commun de Recherche de la Commission Européenne (Joint Research Centre – JRC), en collaboration avec CONCAWE[33] et EUCAR[34]. L'étude de la CCFA[35] a été également réalisée en 2004. Les biocarburants sont comparés au carburant de référence auquel ils se substituent : à l'essence pour la filière éthanol et au gazole pour les EMVH et le gazole de synthèse. L'étude CCFA a été la seule étude à chiffrer les coûts d'évitement de CO_2 pour les carburants étudiés.

Tableau 13 : Résultats des bilans GES des filières biocarburants, comparativement au carburant pétrolier de référence.

	$gCO_2éq$ / km		**Gain par rapport au carburant pétrolier de référence**		**Coût / litre**	**Euros / tonne CO_2 évitée**
	JRC/Eucar	CCFA 09/2004	JRC	CCFA	CCFA 2004	CCFA 2004
Essence	*164*	*161*			*0,25 - 0,27*	
Ethanol de blé	114	93	30%	42%	0,42 - 0,67	154 - 400
Ethanol de betterave	111	50	32%	69%	0,56	160 - 370
Ethanol ligno-cellulosique	36	33	78%	79%	0,25 - 0,56	0 - 160
Ethanol de canne à sucre (Brésil)	19	22	88%	86%	0,19	0
Gazole	*156*	*134*			*0,25 - 0,28*	*n.d.*
EMHV d'huile de colza	73	46	53%	65%	0,34	50 - 200
EMHV d'huile Tournesol	34	36	78%	73%	0,30 - 0,60	25 - 300
Gazole ligno-cellulosique	10	13	94%	90%	0,33 - 0,60	30 - 160

Source : JRC/Concawe/Eucar, 2007 et pour l'étude CCFA 2004 : Cabal, Gatignol, 2004.

Les biocarburants permettent une réduction des émissions de GES de 30% à 94% lorsqu'ils sont utilisés purs.

Cependant du fait de l'inadaptation des moteurs classiques à une utilisation pure, ces carburants sont mélangés aux carburants fossiles à des teneurs relativement faibles : généralement de l'ordre de 5 à 10%, le maximum étant 20-25% au Brésil. En Europe, la réglementation en vigueur limite le taux d'incorporation de l'éthanol à un maximum de 5% pour une utilisation dans les moteurs essence, et jusqu'à 15% dans le cas de l'ETBE. Un calcul des gains en comparaison avec l'essence conventionnelle conduit aux résultats suivants (IFP, 2007) :

- L'essence contenant 5% d'éthanol (E5) permet de réduire de 1% les émissions de GES.
- L'essence contenant 10% d'ETBE (ETBE10), les gains sont de 1,8%.
- L'essence contenant 85% d'éthanol (E85) permet de réduire les émissions de GES de 24%.

Mélangés à de faibles teneurs, le potentiel de réduction des émissions de CO_2 des biocarburants est relativement faible.

D'autre part, le rapport CCFA met en avant la difficulté d'évaluer les coûts exacts de production des biocarburants et les marges de progrès existantes. Selon les évaluations, l'EMHV et l'éthanol se voient reconnaître une compétitivité respectivement entre 35 et 85 USD/bl et de 90 à 150

[32] Les deux études adoptent l'analyse de cycle de vie (ACV) consistant à identifier et quantifier les flux entrants (consommations de matières premières, d'énergie, etc.) et sortants (produits, rejets dans l'air, l'eau et le sol, déchets etc.) de chaque étape du cycle de vie des carburants étudiés.

[33] Association européenne des compagnies pétrolières traitant des questions liées à l'environnement.

[34] qui coordonne les actions de recherche et développement de l'Association européenne des constructeurs automobiles

[35] Comité de Constructeurs Français d'Automobile

USD/bl. (Cabal, Gatignol, 2004). **Les énergies renouvelables** comme le biodiesel, le méthanol ou l'éthanol ne sont **pas économiquement compétitives avec les énergies conventionnelles**. Le développement des filières biocarburants nécessiterait alors des aides significatives, en l'absence de taxe (ou équivalent) sur les émissions de CO_2.

Ainsi l'étude du CCFA met en exergue **des coûts d'évitement des émissions de CO_2 élevés**.

Cabal et Gatignol (2004) affirment que « cette étude, qui aboutit à des fourchettes très larges d'évaluation des coûts de la tonne de carbone évitée, permet de se rendre compte que dans l'état actuel des connaissances et des méthodes de production, le coût du CO_2 évité grâce aux biocarburants dans les transports est très élevé et n'en fait pas forcément une voie à privilégier immédiatement. »

d) Substituer par une autre source d'énergie

Les **véhicules électriques à batteries** offrent un gain environnemental si l'électricité consommée est exempte de CO_2. Sa faible autonomie et le prix du kWh sont les principales barrières à la diffusion de cette technologie. Pour les batteries (plomb, NiCd, NiMH), les prix actuellement pratiqués varient entre 100 USD/kWh pour une autonomie de 50 km (batterie au plomb) et 700 USD/kWh pour une autonomie de 80 à 100 km (batterie au nickel ou au métal hydrure). Les batteries au lithium, encore en développement, devraient offrir une autonomie de 200 km pour un prix de 300-350 USD/kWh. Les experts estiment que les batteries ayant une autonomie supérieure à 200 km ne seront pas disponibles avant 2015 (Cabal, Gatignol, 2004).

Les **véhicules électriques hybrides** sont propulsés grâce à la combinaison de deux sources d'énergie, fossile et électrique. L'hybridation permet d'optimiser le fonctionnement du moteur thermique ou de le remplacer momentanément et donc de réduire la consommation d'énergie fossile et les émissions de CO_2. Il existe plusieurs formes d'hybridation. La technologie hybride est chère : le prix des véhicules hybrides est supérieur d'environ 3000 euros aux séries conventionnelles (Cabal, Gatignol, 2004).

Tableau 14 : Evaluation des puissances électriques nécessaires et économies potentielles des différents types de véhicules hybrides (en conduite urbaine)

Type d'hybride	Fonctions	Puissance électrique	Gain en CO_2
Stop & Start	1 – arrêt du moteur au ralenti	2 kW	8 %
Stop & go	1 + 2 (freinage récupératif)	3 kW	13 %
Mild-Hybrid	1 + 2+ 3 (downsizing moteur thermique et assistance accélération	10 kW	30 %
Full Hybrid (série ou parallèle	1 + 2 + 3 + 4 (mode électrique)	30 kW	45 %

Source : Cabal, Gatignol, 2004.

La **pile à l'hydrogène** apparaît comme une sorte de « pierre philosophale » de l'automobile, un véhicule «zéro émission» (Pridmore, 2002). La majorité des experts s'accordent à dire que la voiture à pile à combustible ne se développera pas avant vingt ans (Cabal, Gatignol, 2004). Les coûts d'une propulsion basée sur une pile combustible alimentée par hydrogène sont très disparates selon la source énergétique utilisée pour la production de l'hydrogène : de 2,1 euros/100 km pour l'hydrogène produit à partir de gaz naturel, à 3,5 euros/100km si l'hydrogène provient d'une électrolyse, en passant par 2,7 euros/100km pour une production à l'aide du charbon et 3,1 euros à partir de biomasse. Par comparaison avec le coût de 100 km propulsé par un moteur à essence (1,8 euros) ou de gazole (1,5 euros), le surcoût pour la filière pile à combustible se situe entre 16% et 133%. De plus, cette

comparaison suppose l'égalité des coûts d'achat et d'entretien des véhicules, ce qui ne correspond pas à la réalité (Cabal, Gatignol, 2004). Par ailleurs, l'hydrogène peut être fabriqué dans des centrales spécialisées, dans les stations-service ou à bord des véhicules. Si l'hydrogène n'est pas produit à bord du véhicule, deux problèmes doivent alors être résolus : son transport et son stockage. Toute la difficulté vient du caractère peu dense[36] et fortement inflammable de l'hydrogène. Il ne peut être transporté que compressé ou liquéfié et dans des conditions strictes de sécurité, ce qui constitue une barrière supplémentaire au développement de la filière hydrogène.

Cabal et Gatignol (2004) résument (tableau 15) les performances environnementales des voitures électriques et hybrides par rapport aux véhicules conventionnels. Il convient de rappeler que cette analyse se base sur le marché français où, du fait de la production nucléaire de l'électricité, le bilan des véhicules électriques est, en comparaison avec d'autres pays, largement inférieur. Ainsi, si l'on compare les profils de production d'électricité de différents pays avec les émissions d'un carburant classique (300 gCO_2/kwh fourni), les réductions d'émissions de GES varient considérablement : 470 gCO_2/kwh pour l'électricité européenne en moyenne, 640 gCO_2/kwh pour l'électricité aux Etats-Unis et 900 gCO_2/kwh pour l'électricité chinoise, alors que l'électricité française se situe à 100 gCO_2/kwh.

Tableau 15 : Émissions de CO_2 du puits à la roue selon les systèmes de propulsion (gCO2/km)

Type de véhicule	Puits au moteur (g CO_2/km)	Moteur à la roue	Émissions totales
Conventionnel	20 à 35	130 à 180	150 à 210
Hybride	24	104	128
Electrique	10 à 14	0	10 à 14

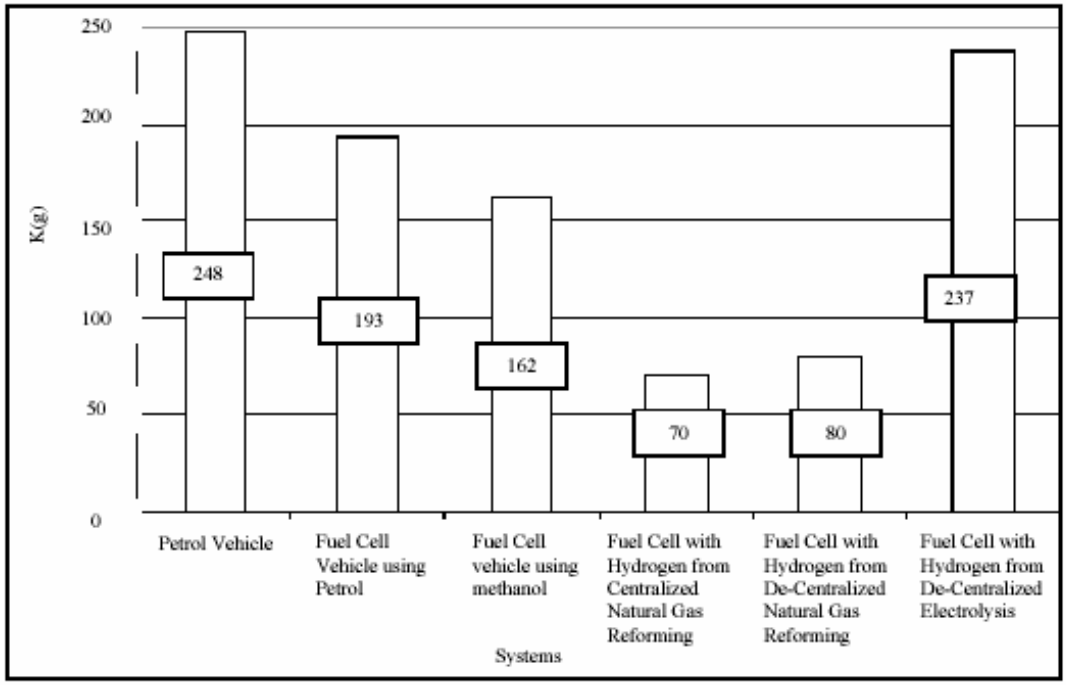
Source : Cabal, Gatignol, 2004

Les réductions d'émissions de GES sont en outre proportionnelles au rôle joué par le moteur électrique dans la propulsion. L'IFP (2007) indique que les gains se situent entre 8% pour un hybride passant en mode électrique uniquement à l'arrêt du moteur et au ralenti, et 45% pour un hybride dont le moteur électrique fonctionne en permanence.

Le Prembina Institute analyse les performances des systèmes à pile à combustible avec les différents moyens de production de l'hydrogène. (Graphe 17)

[36] L'hydrogène est 14 fois plus léger que l'air, 1kg assurant 100 km d'autonomie représente un volume de 12m3

Graphe 17 : Émissions de GES (par 1000 km) pour différents systèmes de moteur à pile à hydrogène



Source : Prembina Institute ,2000 ; Climate-friendly hydrogen fuel, cité in : Pridmore, 2002.

Les émissions élevées d'une production d'hydrogène à électrolyse décentralisée résultent de sa production à partir d'une source fossile (gaz naturel). Si l'hydrogène utilisé était généré à partir d'une source renouvelable, les émissions de CO_2 seraient inférieures à 70 kg par 1000 km.

3) Diffusion du progrès technologique, réglementations environnementales et instruments économiques

Pour avoir un effet significatif sur les émissions de CO_2, il est indispensable qu'une technologie donnée soit diffusée rapidement et massivement sur le marché. Or, le secteur des transports reste soumis à une forte inertie, les véhicules les plus récents ne remplaçant que très progressivement les véhicules anciens. Cette inertie limitant le renouvellement du parc automobile s'explique par 1) le délai nécessaire entre la conception et la mise sur le marché d'une innovation importante en matière de motorisation des véhicules (entre 10 et 15 ans), 2) le temps de pénétration d'une innovation sur les ventes neuves (environ 15 ans hors incitation) et 3) la loi de survie des véhicules selon laquelle un parc automobile met environ 25 à 30 ans pour se renouveler (Cabal et Gatignol, 2004). Ainsi, **les experts estiment qu'une technologie équipera 50% du parc automobile 13 ans après son introduction, et 100% seulement après 35 ans**[37].

A cette lente pénétration d'une technologie nouvelle dans les marchés automobile du Nord, il faut ajouter le temps de diffusion vers les pays en développement : selon l'hypothèse que « plus un pays est riche, plus son taux de véhicules d'occasion est faible », les experts estiment ce temps de diffusion de 5 à 10 ans (Assmann, Sieber, 2005). **Le temps de pénétration d'une innovation importante dans le parc automobile des pays du Sud s'élèverait alors à 40 – 45 ans.**

L'Union Européenne a adopté des normes réglementaires de plus en plus sévères visant à réduire les émissions des polluants locaux par kilomètre parcouru. Ces réglementations sont

[37] L'analyse de la pénétration de la technologie diesel en France confirme ces évaluations. En 1980, 9,9% des voitures neuves étaient diesel, et le seuil des 50% de parts de marché a été franchi en 2001 pour atteindre 69,2% en 2004 (Cabal, Gatignol, 2004).

progressivement appliquées dans d'autres pays en dehors de l'Europe. Le tableau 16 illustre leur diffusion dans quelques pays asiatiques.

Tableau 16 : Diffusion des réglementations d'émission euro 1 à 4 pour des nouveaux véhicules en Asie

Table 8: Emission standards for new vehicles (light duty).
http://adb.org/vehicle-emissions/ASIA/standards.asp?pg=allasia#f1, accessed 14-Apr-04

Country		95	96	97	98	99	2000	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
European Union	Euro 1		Euro 2				Euro 3					Euro 4			Euro 5		
Bangladesh										Euro 2 (under discussion)							
Hong Kong, China		Euro 1		Euro 2				Euro 3					Euro 4				
India[a]								Euro 1				Euro 2					E 3
India[b]						E 1	Euro 2					Euro 3					
Indonesia												Euro 2					
Malaysia				Euro 1			Euro 2										
Nepal							Euro 1										
Philippines										Euro 1							
PRC[a]								Euro 1				Euro 2					
PRC[c]								Euro 1		Euro 2		Euro 3					
Singapore[e]	Euro 1							Euro 2									
Singapore[g]	Euro 1							Euro 2					Euro 4				
Sri Lanka										Euro 1							
Taipei, China						US Tier 1								US Tier 2 for diesel[d]			
Thailand	Euro 1							Euro 2			Euro 3					Euro 4	
Viet Nam[e]					Euro 1												
Viet Nam[f]												Euro 1					

[a] Entire country
[b] Delhi and other cities; Euro 2 introduced in Mumbai, Kolkata and Chennai in 2001; Euro 2 in Bangalore, Hyderabad, Khampur, Pune and Ahmedabad in 2003, Euro 3 to be introduced in Delhi, Mumbai, Kolkata, Chennai, Bangalore, Hyderabad and Ahmedabad in 2005
[c] Beijing and Shanghai
[d] Gasoline vehicles under consideration
[e] for gasoline vehicles
[f] for diesel vehicles
[g] for all types of diesel vehicles

Source : GTZ, 2004.

Les conditions préalables à l'introduction d'une telle législation sont des tests obligatoires de l'état de marche des voitures combinés avec un ensemble de lois définissant les contraventions en cas d'infraction. De telles mesures requièrent donc une autorité engagée dans la lutte contre les pollutions locales et globales.

Ces mesures de natures réglementaire ou technique peuvent être soutenues et complétées par des instruments économiques dont le principe général est d'internaliser, en général par des taxes, le coût environnemental des différents moyens de transports, de manière à dissuader l'usage des plus polluants[38].

Ce genre de mesures est fortement conseillé par des bailleurs de fonds et en particulier par la Banque Mondiale. Elles sont a priori recommandables. Mais elles peuvent avoir pour conséquence d'augmenter significativement le coût des transports urbains, en particulier pour les pauvres, grands utilisateurs de taxis collectifs, bus et autres rickshaws en mauvais état et très polluants. Faute d'offre alternative de transports en commun plus propres et toujours bon marché, ce genre de politique pro-environnementale peut s'avérer aussi anti-pauvre, ce qui est un dilemme.

Au contraire, certaines mesures économiques permettent de combiner l'objectif de réduction des émissions polluantes avec des bénéfices sociaux et économiques (Litman, 2005) :

- La tarification « Pay As You Drive (PAYD) » consiste à indexer la tarification de l'assurance mais aussi d'autres charges directement sur le nombre de kilomètres parcourus dans l'année par le véhicule. Aujourd'hui l'ensemble des taxes et assurance payées pour la possession d'un véhicule sont fixes alors que le coûts qu'elles sont censées couvrir (accidents, dépréciation, usage de la route) augmentent avec la distance parcourue. Les automobilistes reçoivent ainsi une incitation perverse à utiliser au maximum leur véhicule pour amortir leurs frais annuels. Avec une tarification PAYD, plus le véhicule est utilisé, plus le propriétaire paye ; moins le véhicule est utilisé, plus le propriétaire économise. Cela permet d'inciter les propriétaires d'un véhicule particulier à moins l'utiliser, tout en

[38] Exemple de taxe destinée à décourager l'usage de l'automobile : la « congestion tax » londonienne. Exemple de taxe incitative à l'amélioration des véhicules : la vignette différenciée.

rendant ces charges (assurance et autres) plus justes et abordables. Il suffit d'installer un odomètre sur les véhicules et que le compteur soit relevé lors d'une visite annuelle.

- Le « parking cash-out » consiste à recevoir de l'argent en échange de l'abandon à un droit sur une place de parking. La plupart des automobilistes utilisent des places de parking subventionnées (sur le lieu de travail par exemple) alors que les usagers des transports en communs ou les cyclistes ne reçoivent pas de subventions équivalentes. Les employés, par exemple, pourrait choisir entre une place de parking sur le lieu de travail et une carte de transport ou de l'argent liquide.

- La tarification directe des emplacements de parkings en fonction de la durée et de la zone urbaine.

- La taxation des carburants, appliquée à tous les carburants ou au cas par cas en fonction de leur nuisance environnementale.

4) Conclusions

Durant les quatre dernières décennies, les gains d'efficacité environnementale (allègement du véhicule, réduction des frottements, isolation thermique, etc.) n'ont pas pu compenser entièrement l'élévation de la puissance des moteurs et le durcissement des normes de sécurité. Pourtant un potentiel significatif de diminution de la consommation moyenne existe.

L'amélioration de la qualité des carburants existants, notamment en réduisant le contenu en sulfure, est un premier pas vers des transports plus propres. Pourtant, non seulement la qualité de l'essence et du gazole reste médiocre dans les pays du Sud, mais en plus ces carburants sont souvent mélangés à d'autres produits moins chers mais plus polluants.

La substitution par des carburants fossiles moins polluants, comme le CNG et le LPG, permet de réduire significativement les émissions de CO_2 mais leur diffusion est cependant limitée par les contraintes technico-économiques (coût de conversion des moteurs, autonomie limitée, coûts de construction d'un réseau de distribution et stockage).

Les biocarburants ne sont actuellement pas économiquement compétitifs avec les énergies conventionnelles. Une réduction des coûts de production sur le long terme n'est pas attendue. De plus, du fait d'être utilisés en mélange avec les énergies fossiles, les opportunités de réduction des émissions de CO_2 sont relativement faibles.

Les technologies basées sur des sources d'énergie alternatives ne sont pas suffisamment développées pour une utilisation à grande échelle et viable économiquement. La diffusion des moteurs électriques souffre de la faible autonomie, d'un temps de recharge long et du prix élevé des batteries. Les moteurs à hydrogène ont un potentiel très élevé pour réduire les émissions de GES mais ni la technologie, ni son coût économique ne permettent d'envisager une large diffusion à un horizon fiable. La technologie hybride diesel apparaît alors le mode de transition énergétique le plus prometteur car il procure le meilleur rapport gain écologique/coût économique.

Dans la plupart des pays du Sud, les voitures de seconde main venues du Nord dominent la flotte de véhicules. Sur le long terme, les améliorations technologiques vont avoir un impact au Sud mais le temps de diffusion sera long (40 à 45 ans).

L'introduction des normes européennes sur les émissions offre des gains environnementaux significatifs mais requiert une forte volonté politique pour être adoptées et appliquées. Ces réglementations ne se diffusent donc que progressivement.

Ces mesures techniques et réglementaires peuvent être utilement accompagnées par des instruments économiques. Cela pose parfois le dilemme de l'arbitrage entre la lutte contre l'effet de serre et la lutte contre la pauvreté, mais pas toujours.

Ainsi, bien que les différentes mesures d'amélioration de l'efficacité environnementale des véhicules constituent des opportunités de réduction des consommations énergétiques et émissions de GES liées, leur efficacité pour lutter contre l'effet de serre et infléchir significativement les trajectoires des consommations énergétiques dans les villes du Sud reste très limitée. Leur diffusion est lente et leur potentialité de réduction des émissions de CO_2 insuffisante**. Ces mesures techniques et réglementaires sont nécessaires mais certainement pas suffisantes pour relever le défi du changement climatique.** L'absence de maîtrise de la répartition modale et plus profondément des

besoins de déplacement fait que ce genre de mesures n'est pas à la hauteur du défi posé par les dynamiques urbaines au sud, même avec un prix élevé du pétrole.

B - *Promouvoir des Transports Rapides de Masse (TRM)*

La structure urbaine de beaucoup de villes du sud est heureusement aujourd'hui encore adaptée aux systèmes de transports de masse basés sur des corridors de transit. Le développement urbain est souvent canalisé par les grandes artères viaires, et peu dispersé. Même les villes du sud fortement congestionnées sont plus souvent des villes saturées par les voitures que des villes morphologiquement déjà dépendantes de la voiture. A la différence des villes dépendantes de la voiture (les « villes automobile » définies par Schaeffer (1975) et présentées dans le chapitre 1 où les activités sont hautement dispersées), ce contexte offre l'opportunité de flux importants de passagers sur des axes de transit et donc la possibilité de développer des Transports Rapides de Masse (TRM).

Les TRM opèrent généralement selon des fréquences définies, sur des voies dont l'usage leur est réservé, donc en « site propre ». Les TRM se distinguent des transports en commun traditionnels (bus, camionnettes, « busetas », taxis collectifs…) par leur capacité plus importante. Les TRM possèdent généralement des infrastructures d'intégration avec d'autres modes de transports.

On distingue **quatre types de TRM : le métro lourd, le train de banlieue, le métro léger (Light Rail Transit, LRT) et le Bus Rapid Transit (BRT).** Si les métros lourd et léger sont des technologies encore rares dans les villes du Sud, on assiste aujourd'hui à un engouement généralisé pour la technologie du BRT, notamment depuis qu'il a été redécouvert avec succès par la capitale colombienne, Bogota.

Photo 4 : Métro lourd (Santiago et Manille)





Photo 5 : Métro léger (Le Caire et Sapporo)

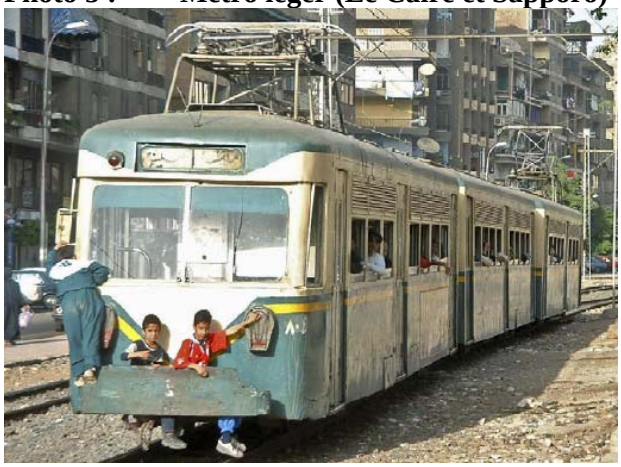




Photo 6 : Train de banlieue (Buenos Aires et Mumbay)



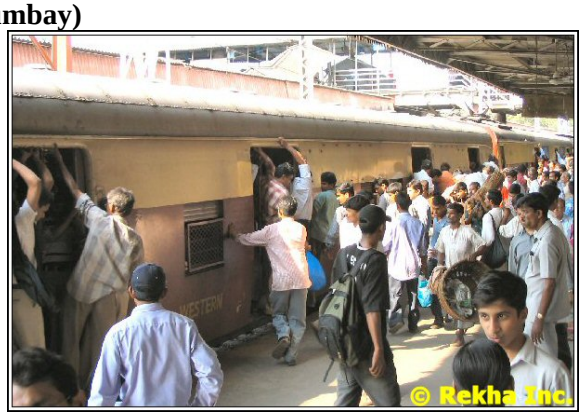
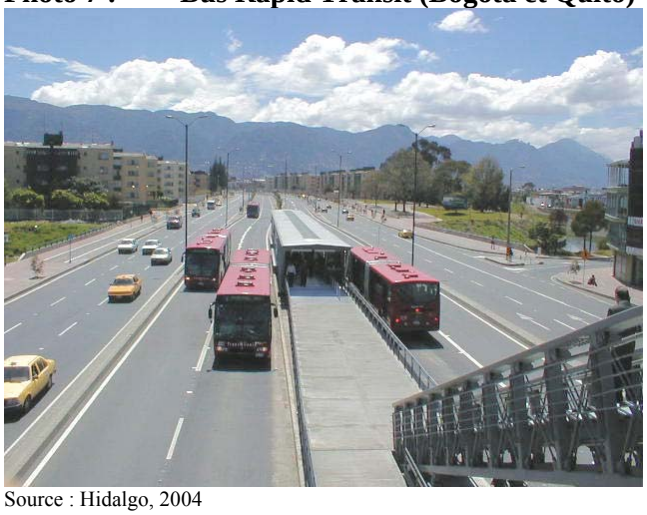


Photo 7 : Bus Rapid Transit (Bogota et Quito)





Source : Hidalgo, 2004

Le métro lourd[39] est le plus coûteux des TRM en investissement initial, coûts d'opération et coûts de maintenance mais aussi celui qui a la capacité théorique la plus importante. Les expériences de métro lourd montrent qu'il est possible de couvrir les coûts d'opération dans les aires urbaines à forte densité, mais cette technologie nécessite généralement des subventions importantes, même pour couvrir les coûts de fonctionnement. Etant donné son coût élevé, le métro lourd ne réussit pas à répondre aux besoins en mobilité des villes du Sud en rapide expansion[40].

Le métro léger[41] (LRT) est un système électrique de rail métropolitain opérant avec des trains courts sur des corridors exclusifs aériens, souterrains ou en surface. Les LRT incluent généralement les tramways bien que ces derniers opèrent souvent au sein du trafic et non sur des corridors exclusifs. De capacité équivalente au BRT, les LRT tendent à disparaître des villes du Sud.

Le train de banlieue[42] est un système rail qui transporte les passagers au sein de l'aire urbaine ou entre la ville et ses banlieues. Il diffère des deux systèmes de métros car ses wagons sont plus lourds, ses trajets sont plus longs et les rails utilisés font généralement partie d'un ancien réseau ferré.

Fonctionnant avec l'électricité, les performances environnementales de ces trois systèmes rail dépendent du mode de production de celle-ci.

---

[39] Au sud, des exemples de métro lourd sont Caracas, Bangkok et Mexico.

[40] Avec 11 lignes sur 150 km, le métro lourd de Mexico sert moins de 15% des déplacements motorisés. Le métro lourd de Buenos Aires, avec 5 lignes, ne couvre que 6% des déplacements motorisés.

[41] La technologie LRT se rencontre notamment à Kuala Lumpur et Tunis.

[42] Au Sud, les exemples de trains de banlieue sont Bombay, Rio de Janeiro et Buenos Aires.

Beaucoup de villes ont développé des variations sur le thème d'un « service de bus amélioré » et le concept de Bus Rapid Transit (BRT) réside plus dans une collection de bonnes pratiques que dans une technique unique. Un BRT opère avec des bus de haute technologie sur des corridors exclusifs, généralement en surface. Il inclut un système rapide de charge et décharge, un paiement performant à l'entrée de stations confortables, une technologie embarquée dans chaque bus pour permettre un suivi et une gestion des opérations, une information des usagers en temps réel et enfin des infrastructures d'intégration modale. Un BRT est bien plus qu'un système de bus opérant sur des corridors réservés : c'est un système intégré et optimisé pour atteindre une qualité et une capacité de transport proche des systèmes rail.

Les BRT comme les LRT, à la différence des métros lourds souterrains ou aériens, nécessitent une réallocation de la voierie existante à un mode de transport plus performant. BRT et LRT diminuent la capacité du réseau offert aux autres modes de transport.

Tableau 17 : Caractéristiques des différents systèmes de Transport Rapide de Masse.

Caractéristiques	Bus en Site Propre	LRT	METRO	BRT
Ségrégation	Au sol	Au sol	Aérien ou Souterrain	Au sol
Espace requis	2-4 voies de route existantes	2-3 voies de route existantes	Faible effet sur les routes existantes	2-4 voies de route existantes
Flexibilité	Elevée	Limitée	Faible	Elevée
Effet sur le trafic	Variable	Variable	Réduit la congestion ? Effet rebond	Variable
Intégration	Simple	Difficile	Difficile	Simple
Niveau de service (fréquence, occupation)	Bon	Bon	Très Bon	Bon
Sécurité	Faible	Bonne	Très bonne	Bonne
Emissions	Elevées	Faibles	Faibles	Elevées Moyennes
Viabilité	Faible	Faible	Elevée	Bonne

Source: Hidalgo (2002) à partir de (Fox, 2000), (Wright, Fjellstrom, 2003), et (Vuchic, 1992)

Dans le cas de villes pauvres, un impact significatif sur la distribution modale des déplacements n'est en réalité possible qu'avec les systèmes TRM basés sur le bus : les BRT. En effet, en raison de leur coût fixe élevé, les nouveaux métros ne peuvent être développés que sur une aire restreinte et n'ont ni la capacité des BRT de couvrir l'ensemble de la demande, ni la flexibilité de s'adapter à une structure urbaine changeante et en expansion. En revanche les expériences de Bogota et Curitiba montrent que le BRT a permis de maintenir voire d'augmenter la part des transports en commun face à l'automobile.

Le premier élément qui explique l'engouement actuel pour la technologie BRT est son faible coût. Ses infrastructures relativement légères permettent de diviser jusqu'à 100 le coût total d'investissement par rapport à un métro lourd. Les stations du BRT de Quito, par exemple, ont coûté seulement 35.000 USD alors que les stations de métro lourd de Porto Alegre, transportant un nombre similaire de passagers, ont coûté 150 millions USD. L'investissement initial total dans le processus de planification, la construction des infrastructures, les équipements technologiques et le matériel roulant pour construire un système BRT est compris entre 1 et 10 millions USD par kilomètre alors que pour

un métro il se situe entre 55 et 220 millions USD par kilomètre. En conséquence, pour un investissement équivalent, le système BRT peut desservir jusqu'à 100 fois l'aire urbaine couverte par un métro. (Wright, Fjellstrom, 2003).

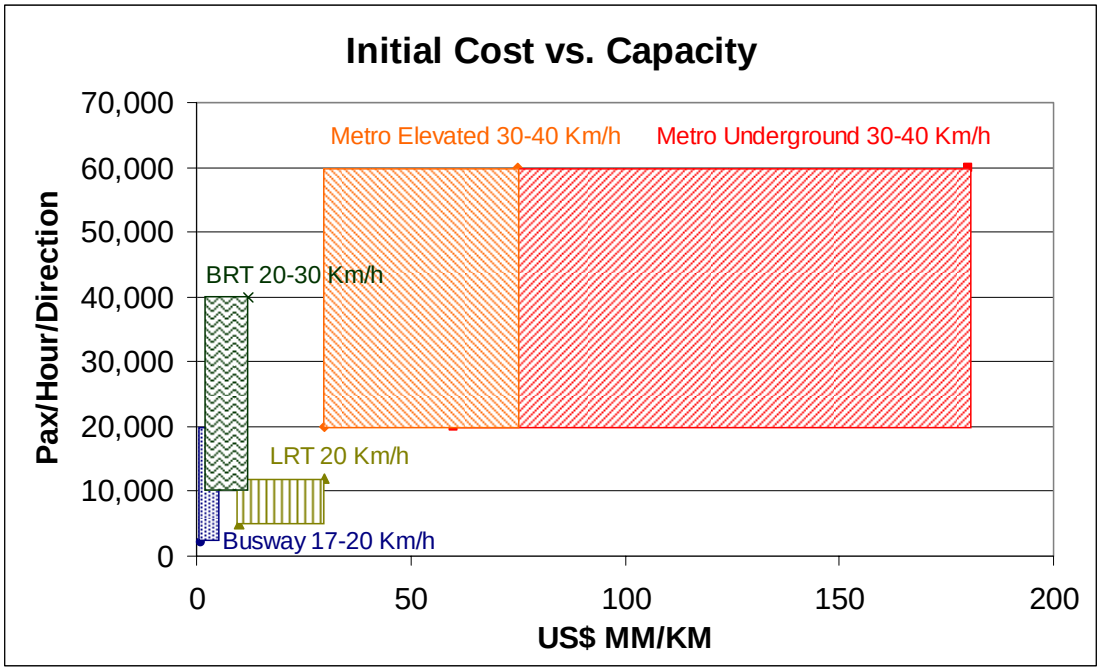
Tableau 18 : Investissements initiaux pour différents système de Transport Rapide de Masse

	type	Coût / km (million USD)
Taipei	BRT	0,5
Quito	BRT	1,2
Curitiba	BRT	1,5
Sao Paulo	BRT	3
Bogota	BRT	5,3
West Rail Hong Kong	Métro Lourd	220
Bangkok Skytrain	Métro lourd	74
Caracas	Métro Lourd	90
Mexico City	Métro Lourd	41
Madrid	Métro Lourd	23
Kuala Lumpur - Star	Métro Lourd	50
Kuala Lumpur -Putra	LRT	50
Manille – Line 3 extension	LRT	50
Tunis	LRT	13
Recife (Brésil)	train de banlieue	12

Source: UTSR 2001; Allport 2000; GTZ 2001.

Hidalgo (Hidalgo, 2004) rapporte dans le graphe 18 le coût initial de différentes infrastructures de transports urbains à la capacité de transport offerte.

Graphe 18 : Comparaison « investissement initial / capacité » pour différents systèmes de Transport Rapide de Masse

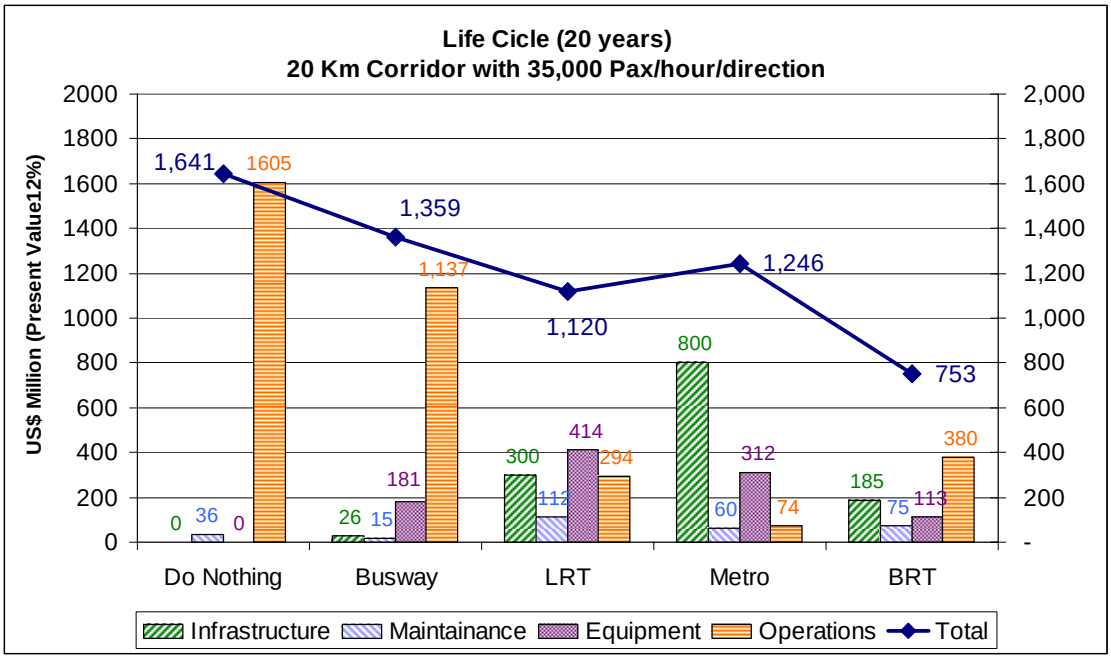


Source: Hidalgo (2004) à partir de (Fox, 2000) pour Busway, LRT et Metro ; et (Wright, 2002) pour BRT

Pour ce qui est du coût opérationnel, les systèmes de métro ont un avantage notamment pour le coût de la main d'œuvre, du fait qu'ils ne demandent qu'un seul chauffeur pour conduire un nombre important de wagons. Mais dans les pays pauvres, la faiblesse des salaires fait que le coût du travail est

largement dominé par les autres composantes. A Porto Alegre (Brésil) opèrent un BRT et un métro lourd dans un contexte similaire. Le système rail nécessite une subvention de ses coûts d'opération à hauteur de 69% du coût par passager alors que le BRT, avec une structure tarifaire similaire, fonctionne sans subvention et génère des profits pour les opérateurs privés (Thompson, 2001). De même une étude de l'ONU réalisée par le GAO (2001) compare six villes des Etats-Unis ayant à la fois un BRT et un LRT et confirme que le coût des opérations d'un LRT est entre 1,6 et 7,8 fois supérieur à celui des systèmes BRT. Hidalgo (Hidalgo, 2004) compare dans le garphe 19 les différents coûts liés au cycle de vie de différentes infrastructures de transports urbains.

Graphe 19 : Comparaison des coûts liés au cycle de vie de différents systèmes de Transport Rapide de Masse



Source : Hidalgo, 2004

Tableau 19 : Coûts de différentes technologies bus comparés à un wagon métro standard

Technologie de Propulsion	Coût / véhicule (USD)
Nouveau diesel, construit en pays en développement	30.000 – 75.000
Nouveau diesel (Euro II)	100.000 – 300.000
Bus CNG, LPG	150.000 – 350.000
Bus hybride électrique	200.000 – 400.000
Bus à pile à combustible	1 – 1,5 million
Wagon metro	1,7 – 2,4 million

Source: International Energy Agency, 2002

Un deuxième élément jouant en faveur des BRT est la rapidité de sa construction du fait d'infrastructures physiques plus simples. Bogota a construit son BRT en 18 mois. Les métros souterrains ou aériens peuvent demander plus de trois ans. Cette composante temps a une dimension politique non négligeable : les maires ont le temps de faire réaliser le projet pour que les électeurs en voient les bienfaits entre le début et la fin d'un mandat et peuvent ainsi en tirer des bénéfices pour leurs carrières politiques.

Le troisième élément est qu'un BRT permet de satisfaire des flux de passagers de l'ordre de grandeur de ceux atteints par les métros (81.000 passagers/heure/ligne pour les métros à haute densité d'occupation de Tokyo ou Hong Kong contre 33.000 pour le BRT de Bogota). Un facteur

important déterminant la capacité d'un système de TRM est la technologie utilisée pour charger, décharger et faire payer les usagers.

Tableau 20 : Capacité observée de différents Transports Rapides de Masse

Ligne	type	Flux de passagers (pass. / h / dir)
Hong Kong	Métro	81.000
Sao Paulo East line	Métro	60.000
Santiago La Moneda	Métro	36.000
Londres Victoria Line	Métro	25.000
Buenos Aires line D	Métro	20.000
Bangkok BTS	Métro	50.000
Kuala Lumpur Putra	LRT	30.000
Tunis	LRT	14.000
Bogota TransMilenio	BRT	33.000
Recife Caxanga, Brésil	BRT	29.800
Sao Paulo 9 de Julio	BRT	34.911
Porto Alegre Assis	BRT	28.000
Quito Trolleybus	BRT	15.000
Curitiba Eixo Sul	BRT	15.100
Ottawa Transitway	BRT	10.000

Source: Wright, 2003.

Un quatrième élément en faveur des BRT est d'offrir une solution au conflit entre la lutte contre la pauvreté et la préservation de l'environnement. Un BRT offre un service de qualité – ce qui permet d'attirer les propriétaires d'automobiles pour qui ce point est critique – à un tarif accessible aux populations pauvres sans pénaliser la rentabilité de l'opération. Et cela sur une urbaine aire importante, ce qui permet aux moins riches, vivant en périphérie de la ville et dépendant des transports publics, d'atteindre les emplois et services offerts par la ville.

Tableau 21 : Consommation d'énergie par pass-km pour différents modes et conditions d'opération

Système de transport	Energie utilisée par passager-km (Watt/heure)
Vélo (20 km/h)	22
Métro avec taux d'occupation élevé (Tokyo, Hong Kong)	79
Bus (Khartoum, Soudan)	99
Bus (taux d'occupation de 45%)	101
Para-transit (minibus, Khartoum)	184
Métro avec taux d'occupation faible (Allemagne)	184 - 447
Metro (taux d'occupation 21%)	240
Para-transit (taux d'occupation 67% / minibus)	317
Bus (8 ou 9 passagers , USA)	875
BRT (CNG, 160 passagers)	50
BRT (Bogota, diesel, 160 passagers)	60
Voiture	1429

Source: (Wagner, 2002) cité dans (GTZ, 2005) ; (Lent, 2004) pour la voiture.

D'un point de vue environnemental, tous les TRM sont avantageux dans la mesure où ils remplacent des déplacements en voiture ou en bus très polluants. Si le rail est en théorie le TRM le plus économe en énergie, le taux d'occupation est cependant un facteur déterminant. Les émissions

dépendent par ailleurs évidemment de la source d'énergie utilisée pour produire l'électricité. A Bogota, le BRT fonctionnant au diesel émet du CO_2 alors que le BRT de Quito fonctionnant à l'hydro-électricité n'en émet pas.

C - *Ne pas oublier les déplacements non motorisés*

Dans la plupart des villes du Sud, la marche à pied et le vélo représentent encore des parts importantes de la répartition modale des déplacements. Malgré cela, ils sont le plus souvent ignorés de la planification urbaine. Faute d'un « design urbain » adapté, d'une séparation du trafic routier et tout simplement de trottoirs où marcher, ces modes de déplacement non motorisés sont dangereux et tendent à disparaître. Les investissements sont cependant modestes (entre 25.000 et 150.000 USD par kilomètre de piste cyclable), notamment par rapport aux sommes engagées par des politiques «pro-automobile». Par exemple, à Bogota où le vélo avait pratiquement disparu, la municipalité a construit en quelques années 300 km de pistes cyclables, soit le plus important réseau d'Amérique latine. La part modale du vélo est passée en quelques années de 0,4% à plus de 3% de l'ensemble des déplacements.

D - *Faciliter l'intermodalité*

L'intermodalité désigne le fait d'utiliser différents moyens de transports au cours d'un même déplacement[43].

Afin de développer l'utilisation des transports en commun et des modes de transports non-motorisés et donc de réduire l'usage des véhicules particuliers, il est nécessaire de faciliter l'intermodalité. Différentes mesures pratiques peuvent favoriser l'intermodalité : l'intégration tarifaire, la facilité et la sécurité du stationnement pour les automobiles et les vélos à proximité des gares et stations des différents réseaux de TRM, le développement des parc relais en périphérie des villes, l'aménagement des interconnexions entre les différents réseaux de transports en commun, l'ajustement des horaires et des fréquences des différents modes de transports interconnectés, la possibilité de monter avec son vélo dans les TRM, le développement du covoiturage.

L'objectif est d'améliorer la cohérence, les correspondances et donc la complémentarité entre les réseaux de transport en tenant compte des logiques de déplacement.

E - *L'espace offert aux différents modes de transport*

L'espace réservé pour les différents modes de transport est un enjeu crucial. Aujourd'hui, une idée de plus en plus partagée parmi les urbanistes est que le partage de la voirie entre les véhicules motorisés et les autres modes de transport est un élément clef dans la lutte contre une motorisation explosive. L'espace offert – sous forme de site propre pour les transports en commun, de pistes cyclables ou de trottoirs pour les transports non motorisés – est une incitation forte à leur usage. De même adapter la taille des trottoirs ou des pistes cyclables aux flux de piétons ou de vélos qui les empruntent – et non en fonction de considération uniquement esthétique – augmente le confort de ces modes et par là leurs usages.

Enfin la gestion des places de stationnement est capitale dans la gestion du trafic. Les études comportementales montrent que les pratiques modales sont largement dictées par les conditions de stationnement à destination (Kaufmann, Guidez, 1998). Le nombre et la tarification des places de parking offertes dans une zone d'attraction des déplacements déterminent le nombre de voitures qui vont être utilisées pour s'y rendre.

[43] A la différence de la multimodalité qui désigne le fait d'utiliser différents moyens de transport en général.

III - Les politiques visant à réduire la demande de mobilité

Les outils dont dispose une municipalité pour influencer le développement spatial d'une ville et réduire le besoin de mobilité de ses citadins sont limités et en principe, ce sont les mêmes au Nord comme au Sud. Ces outils peuvent être regroupés en trois catégories : les investissements en infrastructures primaires (réseaux), les règlements d'utilisation de sols et la fiscalité foncière. Nous discutons successivement ces trois catégories de politiques, mais auparavant nous nous interrogeons sur un préalable aux politiques d'usage des sols : la définition et l'attribution des droits de propriété du sol, et l'établissement d'un cadastre.

A - *Droits de propriété et cadastres : un préalable aux politiques d'usage des sols ?*

La réglementation de l'usage des sols et la fiscalité foncière nécessitent un cadastre ou du moins un support d'information foncière s'en rapprochant. Et c'est là que la situation est très différente au Nord et au Sud. Elaborer un cadastre pose immédiatement la question ardue de la définition et de l'attribution de droits de propriété sur le foncier et le bâti. Ces droits sont effet, dans la plupart des villes du sud, très complexes. On trouve une juxtaposition de systèmes traditionnels et importés, et des droits d'extension très variés par rapport à la simplicité théorique du droit romain et même du droit anglo-saxon. Naturellement dans ces villes, beaucoup occupent et ont bâti sans aucun droit, ni coutumier ni moderne, en particulier sur des terrains publics.

Il est facile d'affirmer, comme le font un grand nombre d'experts des agences de développement, que la priorité dans les villes du sud est de définir des droits de propriété, et de les attribuer à des propriétaires publics ou privés, de manière à ce que les marchés fonciers et immobiliers fonctionnent et que les autorités publiques puissent les influencer par des réglementations et des taxes. C'est certainement vrai en théorie. Mais pour cela, il faut élaborer des cadastres et préciser les droits. Or dans la pratique, selon Renard (Renard, 2002), les cadastres et les systèmes juridiques d'application des droits de propriétés urbains longuement mis en place dans la villes riches, et qui sont aujourd'hui proposés aux villes du sud par les consultants, ont une sophistication qui induirait des temps de mise en place tels, que les cadastres ne seraient pas terminés avant la fin de l'actuelle phase d'expansion urbaine rapide. De plus, comme le souligne aussi Comby, l'élaboration d'un cadastre sophistiqué peut être un frein au développement de la propriété (Comby, 2000). D'une part les fonctionnaires chargés de la préparation de cadastre, à supposer qu'ils soient insensibles à toute tentative de corruption, ne sont pas incités à perdre un pouvoir que leur confère précisément le fait d'être dans la phase de préparation du cadastre (Renard, 2003). D'autre part l'implantation trop brutale d'un mécanisme d'enregistrement des transactions liée à l'établissement d'un cadastre peut conduire à des comportements d'évitement du système modernisé et au retour au système traditionnel. Renard (Renard, 2001) cite le phénomène des « titres gelés » en Tunisie : face à une fiscalité sur les transactions estimée trop lourde, assortie de la délivrance d'un titre de propriété « moderne », les acteurs des marchés fonciers et immobiliers préfèrent rester dans le système traditionnel et échapper ainsi au paiement des droits d'enregistrement. **En matière de légalisation et d'enregistrement de la propriété foncière, il faut faire beaucoup plus simple au prix d'approximations qui se régleront dans le temps.**

Ces critiques ne sont pas restées totalement sans écho. On peut noter par exemple que la technique simple de « l'adressage » a été développée dans un certain nombre de pays, en particulier dans des programmes de la Banque Mondiale. L'adressage consiste à constituer un fichier de la population urbaine au départ très simple, puisque l'«information racine» est simplement l'adresse. On peut ensuite, selon les besoins et les capacités de collecte de l'information, lui ajouter progressivement

un grand nombre de données (type de voirie ou de bâtiments, superficie, numéro de compteur d'eau, etc.) utiles à la municipalité dans la formulation et la mise en œuvre de sa politique urbaine.

B - *Les investissements en infrastructures primaires*

Les investissements dans les infrastructures d'eau, d'assainissement et d'électricité influencent évidemment la structure spatiale. En règle générale, le développement foncier privé ne peut se faire qu'à une distance approximative de un à deux kilomètres des infrastructures primaires, parfois beaucoup moins dans les terrains de topographie difficile (Bangkok, par exemple). Le manque d'infrastructures a donc tendance à disperser l'espace construit le long des radiales de communication régionale.

Ainsi, par exemple, dans le cadre d'une stratégie de renforcement du centre ville (monocentrisme), les pouvoirs publics doivent veiller à ce que les infrastructures primaires servent toutes les zones urbaines les plus proches du centre ville en priorité. Les urbanisations linéaires le long des grands axes routiers radiaux, donc un développement « en étoile » de la ville basé sur la route, sont généralement liés à des carences d'infrastructures primaires dans les zones situées entre les voies radiales et plus proches du centre.

Les effets des investissements dans les infrastructures primaires sur l'évolution de la structure urbaine ne sont que rarement pris en compte dans la planification urbaine.

C - *Les règlements d'usage des sols*

1) Réglementation : de l'offre foncière à la production foncière

Un consensus existe aujourd'hui pour dénoncer, dans nombre de pays, les excès et l'hypertrophie de la réglementation de l'usage des sols, avec une cascade de conséquences en termes de délais, de coûts et d'insécurité juridique pour l'activité de production foncière et de bâti (Renard, 2003). L'empilement, la complexité et la cohérence parfois incertaine des règles, peuvent constituer un obstacle au développement maîtrisé de l'espace par les stratégies de contournement de la règle qu'ils induisent et le climat d'incertitude qu'ils contribuent à créer. Simplification et clarification sont des impératifs peu contestables, et ils constituent un enjeu important. Mais derrière ce consensus sur l'impératif de simplification et de clarification, s'ouvrent de vifs débats sur la nécessité et les modalités de la réglementation d'usage des sols.

Les tenants de la déréglementation estiment que la réglementation foncière est souvent la cause principale de dispersion spatiale, ce qui peut paraître paradoxal puisque la dispersion n'est jamais l'objectif explicite des règlements. L'argumentation est pourtant simple : les règlements imposent toujours des tailles minimum des parcelles, des densités et coefficient d'utilisation de sols maximum et très rarement l'inverse[44]. Par conséquent, les règlements obligent les ménages à consommer plus de terrain qu'ils ne le feraient s'ils étaient libres de consommer la quantité qu'ils désirent. Les ménages pauvres ne peuvent avoir accès au foncier qu'en consommant moins de terrains que les classes moyennes. L'imposition d'une consommation de terrain minimum – résultant de la réglementation des tailles de parcelles et des coefficients d'occupation des sols – pousse les pauvres vers la périphérie où

[44] En France, la loi du 31 décembre 1975 crée le Plafond Légal de Densité (PLD) qui « a pour objectif de peser sur les valeurs foncières dans les centres villes et d'éviter la densification de ceux-ci » (Inventaire général des impôts locaux, http://www.dgcl.interieur.gouv.fr/publications/). Le bénéficiaire d'un permis de construire en dépassement du PLD doit verser à la commune une somme égale à la valeur du terrain dont l'acquisition serait nécessaire pour que la construction n'excède pas le plafond. La commune ne peut pas renoncer au versement de cette somme compensatoire. Le règlement du POS désigne les zones ou partie de zones où le COS pourra être dépassé. En l'absence de dispositions explicites en ce sens dans le POS, tout dépassement constitue une illégalité.

le prix du terrain est compatible avec la densité réglementaire ou vers des zones de bidonvilles plus centrales qui échappent à la réglementation, mais qui sont limitées en surface. De même, s'agissant des populations riches, la hausse des prix du foncier au centre renforce leur préférence à résider en périphérie où les terrains moins chers leur permettent de compenser les temps et distances de transports par des résidences plus spacieuses. Ces tendances convergentes augmentent les besoins de mobilité. Ainsi **la dispersion urbaine s'expliquerait par la hausse des prix fonciers due à l'insuffisance de l'offre, elle-même conséquence des règles restreignant le droit de construire**.

Dans le cadre de politique de lutte contre l'envolée des prix fonciers et immobiliers et contre l'étalement non maîtrisé, des stratégies d'«offre foncière» (privée), fondées sur une déréglementation du droit des sols, ont été menées dans divers pays. Pour Renard, ces politiques se sont montrées de façon récurrente décevantes, voire franchement contre productives (Renard, 2002).

En particulier, une déréglementation des terrains en périphérie urbaine ne s'avère pas être le bon outil pour lutter contre l'envahissement de terrains non urbanisables et l'étalement urbain incontrôlé. En périphérie on doit constater, après de nombreuses expériences, que la déréglementation pure et simple en vue de faire baisser les prix et favoriser l'accès aux marchés foncier et immobilier des populations pauvres non seulement ne fonctionne pas, mais peut de plus s'avérer très inefficace par la dispersion qu'elle risque d'engendrer, avec comme conséquences le renchérissement de la fourniture des services urbains de base (voirie, eau, assainissement, électricité, etc.) et la dépendance accrue à l'égard du transport individuel. **Il semble préférable de mettre en place des opérations de «production foncière», qui au sens propre « préparent le terrain » à l'urbanisation privée**. Il s'agit que des agences publiques, ou des opérateurs privés sous contrat, anticipent les extensions urbaines et les canalisent par l'offre d'infrastructures de base minimum. Selon Arnaud (Arnaud, 2004), le minimum est le traçage des futures voies et le drainage des terrains, ensuite seulement l'arrivée des réseaux.

2) Densité et mixité

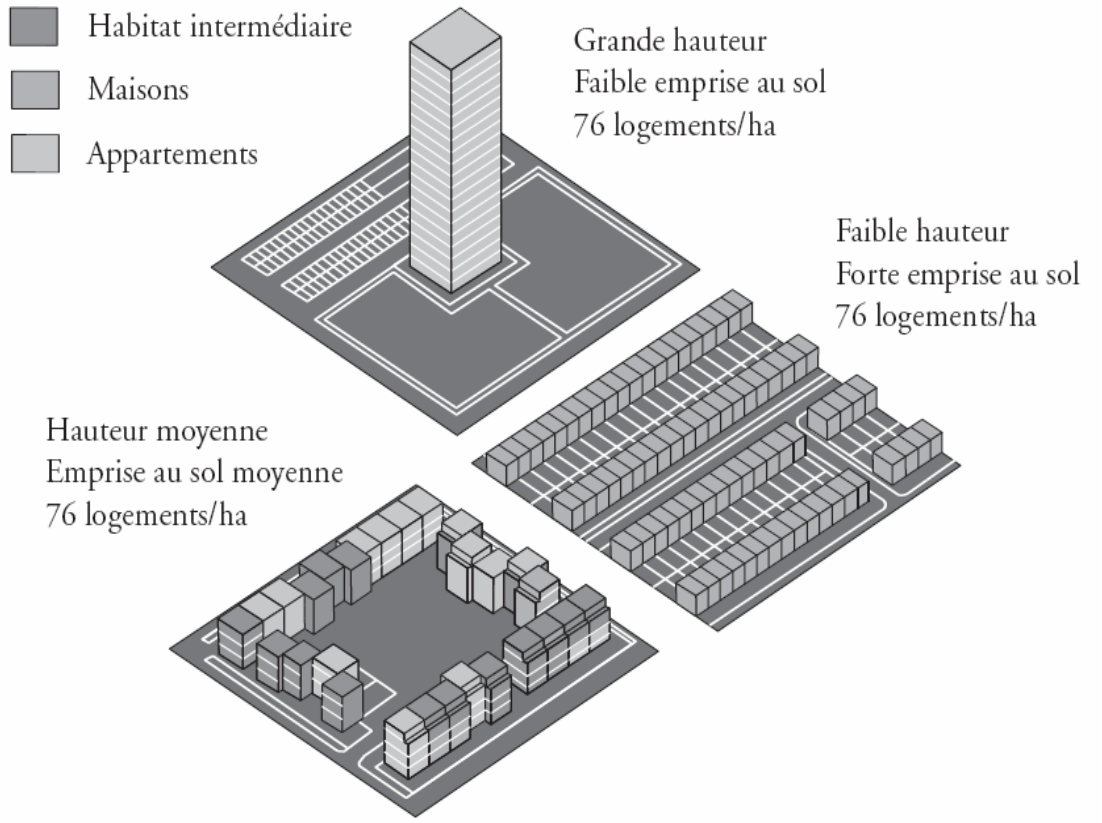
Par contre **il semble clair que des limites minimum de taille de parcelle et maximum de COS et de densité peuvent être un obstacle à une intensification et une diversification de l'usage des sols en centre ville**. Dans des zones à forte accessibilité, modifier ces règlements (taille maximum de parcelle, densité et COS minimum) et adapter les POS afin de faciliter la mixité fonctionnelle permettraient de concentrer les investissements privés et donc les origines et destinations des déplacements quotidiens. Un cas particulier mais important dans certaines villes (Casablanca, ou la plupart des villes d'Asie du sud, par exemple) est celui des bidonvilles incrustés au cœur de la ville. Les raser et reloger les habitants à la périphérie a longtemps été et reste encore souvent la seule politique officielle. En attendant, la production de logements publics pour le relogement des « bidonvillois » étant toujours insuffisante (l'offre de logements privés étant évidemment trop chère ou trop éloignée de la ville, sinon les gens ne vivraient pas dans les bidonvilles), et les habitants résistants à l'exil dans de lointaines périphéries (souvent même pas desservies par des transports en commun), on ne parvient jamais à éradiquer les bidonvilles qui se reproduisent sans cesse. Dans certains pays, par exemple récemment au Maroc, on envisage enfin de restructurer les bidonvilles en maintenant sur place l'essentiel de leurs habitants. Mais cela exige toujours de redéfinir les normes (parcelles minimum, COS et normes d'habitat) qui sont censées s'appliquer dans les quartiers « formels ».

Encadré 9 : Coefficient d'Occupation des Sols et Plan d'Occupation des Sols

Coefficient d'Occupation des Sols (COS) (IAURIF, 2005)
Le coefficient d'occupation du sol (COS) est l'outil réglementaire qui permet de définir un «droit à bâtir» sur une parcelle. Il représente les possibilités de construire sur une parcelle. Il est la densité rendue possible par le règlement d'urbanisme. Cependant, ce n'est pas un outil de maîtrise de la forme des bâtiments. Celle-ci est modulée selon d'autres règles d'urbanisme : la hauteur, le rapport du bâtiment avec la rue, ou avec les autres bâtiments, etc.
Par exemple, un COS de 1 peut produire des formes de bâtiments très contrastées : pour 100 m² de surface bâtie sur un terrain de 100 m², il peut y avoir un bâtiment d'un seul étage sur toute la surface

du terrain, ou un bâtiment de deux étages sur la moitié du terrain, ou de quatre étages sur le quart du terrain, etc.

$$COS = \frac{\text{surface constructible}}{\text{surface de parcelle}}$$



Plan d'Occupation des Sols (POS)

Le plan d'occupation des sols (POS) était un document d'urbanisme prévu par le droit français, dont le régime a été créé par la loi d'orientation foncière de 1967, et qui a été supprimé par la loi relative à la Solidarité et au Renouvellement Urbains du 13 décembre 2000, au profit des nouveaux Plans Locaux d'Urbanisme (PLU).

Le POS était un document local, généralement établi à l'échelle de la commune, pour le moyen terme (10 à 15 ans). Il « fixe les règles générales et les servitudes d'utilisation des sols, qui peuvent notamment comporter l'interdiction de construire ». Il concernait toutes les propriétés, qu'elles soient privées ou publiques et déterminait notamment les droits à construire et les conditions d'évolution attachés à chaque propriété. Ce document juridique, de portée générale, s'imposait à tous, particuliers et administrations et constituait la référence pour l'instruction des permis de construire et des autres autorisations d'urbanisme. Le POS découpait le territoire sur lequel il s'appliquait en plusieurs zones : urbaines et naturelles. Grâce à ce zonage, chaque propriétaire pouvait déterminer si son terrain était constructible, dans quelles limites et moyennant quelles contraintes de taille et d'implantation du bâtiment, d'aspect, etc.

3) Le contrôle des mutations

La modification du POS comme du COS d'un terrain peut faire l'objet d'une négociation entre le propriétaire et la collectivité. Couramment pratiquée dans le monde anglo-saxon, le contrat permet, par exemple, à un propriétaire de rendre constructible sa terre moyennant la vente à bas prix à la collectivité d'une partie des terrains aménagés.

4) L'intervention publique directe

L'Etat ou les collectivités locales peuvent, à travers plusieurs mécanismes, se constituer des réserves foncières qui leur permettent par la suite d'administrer eux-mêmes les terrains, et donc de choisir leur utilisation. Trois mécanismes juridiques permettent aux autorités publiques d'agir directement sur les marchés foncier et immobilier.

Les réserves foncières ont l'inconvénient de représenter une charge financière importante pour les collectivités lors de l'achat (préemption) ou de l'indemnisation (expropriation), ainsi qu'une immobilisation de capital par la suite. Leur utilisation dans les villes pauvres du Sud est aujourd'hui limitée.

a) Le droit de préemption

Le droit de préemption est un droit légal accordé à certaines personnes privées (locataire, fermiers, indivisaire, …) ou publiques (collectivité territoriale, banque foncière, agence foncière, …) d'acquérir un bien par priorité à toute autre personne si le propriétaire manifeste sa volonté de vendre. En pratique, lorsqu'un droit de préemption existe, le propriétaire doit notifier, préalablement à la vente, son projet de vente au titulaire du droit de préemption.

Ce droit peut avoir différents objectifs : mettre en place une politique locale de l'habitat (favoriser l'accès à la propriété), organiser le maintien, l'extension ou l'accueil des activités économiques, favoriser le développement d'activités récréatives, réaliser des équipements collectifs, lutter contre l'insalubrité, sauvegarder ou mettre en valeur le patrimoine bâti ou non bâti et les espaces naturels.

b) Le remembrement foncier

Le remembrement foncier est une opération d'exécution d'un plan d'aménagement qui consiste à remodeler un parcellaire existant de façon à le faire concorder avec les dispositions du plan à réaliser. Le remembrement peut s'effectuer soit par voie d'accord entre les propriétaires, sous forme d'échanges amiables, soit sous forme légalement imposée.

c) L'expropriation

L'expropriation est l'outil unilatéral par excellence puisqu'elle permet à l'autorité publique de se saisir d'un terrain sans explication particulière. Du fait de l'atteinte à la propriété privée qu'elle représente, l'expropriation est peu utilisée, et est en général accompagnée d'une indemnisation. Elle constitue donc une charge financière pour la collectivité qui préfère utiliser d'autres outils.

5) L'articulation entre le règlement d'utilisation des sols et le système de transport

La réglementation des usages des sols fixent les usages autorisés des terrains par des méthodes qui vont d'un simple zonage à un Plan d'Occupation des Sols (POS) contraignant et, pour les terrains déclarés constructibles, l'intensité de construction, par exemple sous forme d'un COS (Coefficient d'Occupation des Sols) qui détermine la surface constructible par rapport à la superficie du terrain.

Agir sur le couple « transport – usage des sols » signifie que la réglementation de l'usage des sols doit être articulée au système de transport. L'encadré 10 illustre cette nécessaire coordination des politiques de transport et d'usage des sols.

Encadré 10 : Exemple de « bonne pratique » de politiques intégrées transport – urbanisme aux Pays Bas.

Aux Pays-Bas, la politique « ABC » constitue une application des principes de coordination entre les densités et les dessertes en transports. Le plan d'aménagement du territoire des Pays-Bas daté de 1991 cherche à « dissuader l'usage de l'automobile en particulier pour les déplacements domicile-travail ». La politique ABC consiste à classer les zones urbaines en fonction de leur desserte et à localiser les générateurs de déplacements en concordance. Elle vise à «placer la bonne entreprise au bon endroit». La politique ABC définit une stratégie de localisation croisant le « profil d'accessibilité » du lieu et le « profil de mobilité » de l'entreprise ou du service en termes de personnes et de marchandises.

Les zones urbaines sont divisées en trois types de profil d'accessibilité :
Localisation de type A : ces zones profitent d'une très bonne accessibilité par les transports publics et présentent un taux de 10 places de stationnement pour 100 employés.
Localisation de type B : ces zones intermédiaires sont bien desservies par les transports publics et profitent d'une accessibilité assez facile en voiture couplée à un taux de 20 places de stationnement pour 100 employés.
Localisation de type C : ces zones sont mal desservies par les transports publics, mais profitent d'une bonne accessibilité routière (proximité du réseau routier) couplée à un taux de 50 places de stationnement pour 100 employés.

Les entreprises sont divisées en trois types de profil de mobilité, selon trois indicateurs caractérisant leurs besoins en surface et en accessibilité :

	Type A	**Type B**	**Type C**
Intensité d'emplois	< 40 m²/employé	40 – 100 m²/employé	> 100 m²/employé
Intensité de visiteurs (surface nécessaire par visiteur)	Flux journalier de visiteurs (< 100 m²/visiteur)	Visites fréquentes (100 – 300 m²/visiteurs)	Visites imprévisibles (> 300 m² / visiteur)
Recours au véhicule particulier pour le travail. Transport routier de marchandises	Peu important	Relativement important	Important
Exemples	Commerces / bureaux	Santé	Industrie / transport

Cette politique fonctionne dans les deux sens :
- Elle essaie d'implanter les entreprises qui cherchent un nouvel emplacement dans les endroits correspondant à leur besoin en mobilité.
- Elle essaie d'améliorer l'accessibilité des localisations en fonction du type d'entreprises présentes sur un site.

Dans les principales zones urbaines, une entreprise peut disposer d'une place de stationnement pour 10 employés en zone A, d'une place pour 5 employés en zone B, et d'une place pour 2 employés en zone C.
La politique ABC a fait l'objet d'une première évaluation en 1996 (Roussel, Theys, 1999) (Martens, Griethuysen, 2000).
L'objectif est de placer la bonne entreprise au bon endroit mais il n'y a pas toujours suffisamment de surface correspondant au type de localisation nécessaire. Ainsi dans les localisations de type A, et également, dans une moindre mesure, celles de type B, la surface disponible pour la construction de nouveaux bâtiments est fortement limitée.

La plupart des collectivités locales ont intégré cette politique dans leurs plans d'occupation des sols. Près de 90% des zones avaient effectivement fait l'objet d'un classement. Mais la majorité des zones n'étaient en réalité classées ni en zone A, ni en zone B, ni en zone C mais dans la catégorie 'autres localisations'.
Malgré une prise en compte théorique de cette politique par les grandes municipalités (notamment dans leur plan d'occupation des sols), la mise en pratique concrète est difficile. Dans les négociations avec les entreprises, les pouvoirs publics atténuent leurs exigences pour des raisons économiques. Or les entreprises se sont fortement opposées aux limitations de stationnement et les collectivités locales ont souvent tenu compte de leurs points de vue.

D - *La fiscalité foncière*

L'usage de la fiscalité foncière comme outil d'urbanisme participe à une tendance générale depuis les années 1980 de privilégier des outils qui distordent moins les marchés que les réglementations. La fiscalité foncière et immobilière peut avoir trois objectifs.

- Productif : les recettes fiscales fournissent des capacités financières aux collectivités locales et à l'Etat, parfois conséquentes comme la « *property tax* » aux Etats-Unis.
- Redistributif (équité) : la construction d'équipements collectifs, d'infrastructures publiques valorise les terrains, les propriétaires obtiennent donc une plus-value lors de la revente de celui-ci. L'impôt foncier permet de récupérer une partie de cette plus-value.
- Incitatif : la modulation de l'impôt en fonction de l'utilisation faite du terrain permet d'orienter celle-ci selon l'intérêt général.

La taxation foncière peut avoir un effet indirect mais important sur la structure spatiale urbaine en modifiant la quantité de terrain consommée, et en favorisant ou paralysant les transactions. Si on lui assigne des objectifs de structuration urbaine, cet impôt doit être capable (par son assiette et son taux) de s'adapter à l'évolution des marchés. Ce qui nécessite une observation et donc une certaine publicité des transactions immobilières et foncières. D'autre part, il est nécessaire d'harmoniser les points de vue de l'administration en charge des finances et de celle responsable de l'équipement, la première se préoccupant légitimement du rendement et du coût de gestion de l'impôt, la seconde pouvant être davantage attachée aux fonctions incitatives spécifiques que peuvent assurer des dispositifs fiscaux, par exemple contribuer à accroître l'offre foncière, ou inciter à telle ou telle utilisation de l'espace…

L'exemple des Etats-Unis offre une bonne illustration de ce que peut être un impôt foncier conçu d'abord comme producteur de ressources importantes : le produit de la « *property tax* », assis sur la valeur vénale[45] des biens immobiliers, rapporte près de 70% des recettes fiscales des collectivités locales. Cependant, le poids de cet impôt et la réévaluation régulière de sa base permettent de l'utiliser aussi comme un outil incitatif en jouant sur la modulation de l'assiette et des taux, éventuellement par voie contractuelle. C'est ainsi que ces formes de fiscalité incitative, correctement articulés avec une planification spatiale et un zonage bien maîtrisé, permettent de conserver le caractère d'espace agricole ou d'espace naturel de zones périurbaines soumises à de fortes pressions. On peut citer aussi l'exemple danois où, un système sophistiqué de fiscalité foncière également fondé sur une évaluation actualisée en permanence des valeurs de marché, permet pratiquement de neutraliser l'impact des règles d'urbanisme sur le prix des biens, en particulier en taxant lourdement la transformation des terrains agricoles en terrains à bâtir.

Ainsi en théorie, et en pratique dans certaines villes riches, **un système de taxation foncière peut utilement soutenir et compléter des politiques réglementaires de densité et de mixité, de concentration des origines et destinations des déplacements quotidiens, et de lutte contre l'étalement urbain**. Naturellement dans les villes du sud, en raison de l'absence et de l'imprécision des cadastres et de ce qui en tient lieu que nous avons évoquées ci dessus, en raison de l'existence

[45] La valeur vénale correspond à la valeur marchande du bien immobilier, c'est-à-dire le prix que le propriétaire d'un bien immobilier pourrait retirer de la vente de ce bien, par le jeu normal de l'offre et de la demande.

fréquente d'un marché informel des droits dont les prix sont moins bien connus[46], l'usage incitatif de la fiscalité foncière est plus difficile, et ce serait un erreur de la recommander quand les conditions de son efficacité ne sont pas réunies.

Ce qui semble progresser, en revanche, ce sont les **diverses méthodes visant à faire participer au financement d'une infrastructure publique les propriétaires dont les droits bénéficient** d'une appréciation en raison de cette infrastructure : l'arrivée d'un réseau d'assainissement, d'une voirie goudronnée avec trottoirs, ou d'un système de Transport Rapide de Masse.

L'urbanisation coûte cher et se pose donc la question du financement des infrastructures. Il existe en fait trois logiques (plus une), selon que l'on décide de faire payer :

- les propriétaires fonciers et immobiliers, parce que les équipements publics valorisent les terrains et les immeubles qu'ils desservent.
- les promoteurs, parce que ce sont les urbanisations nouvelles qui nécessitent la constructions de nouveaux équipements.
- les contribuables, parce que ce sont les utilisateurs des équipements.

Un dernier mode de financement consiste à rendre payant l'accès au service rendu par l'infrastructure ; les équipements publics deviennent alors des services commerciaux publics ou privés.

La première logique consiste donc, au nom de l'équité, à mettre les équipements publics à la charge des propriétaires fonciers et immobiliers qu'ils desservent et valorisent. Une méthode moins brutale consiste à taxer les plus-values réalisées lors de la vente des terrains ou immeubles et d'affecter cette taxe au financement des infrastructures. Cette stratégie comporte un risque de gel des terrains à urbaniser et pose le délicat problème de la mesure des relations entre l'équipement et les plus-values. Reste la mise à contribution annuelle de l'ensemble des propriétaires en fonction de la valeur de leur propriété, avec l'idée sous-jacente que cette valeur est liée au niveau d'équipement de la zone et que la taxe annuelle est assimilable à un loyer pour disposer des équipements. Mais si le raisonnement est logique pour les frais de fonctionnement, il est plus délicat pour la création de nouveaux équipements qui ne bénéficieront qu'à un secteur particulier de la ville.

La deuxième logique consiste à faire financer les nouveaux équipements d'un secteur en cours d'urbanisation en taxant les nouvelles constructions ou en obligeant les aménageurs - constructeurs à participer à la réalisation des travaux[47]. Mais le promoteur n'est pas le payeur final. Conformément au mécanisme du compte à rebours[48] (Renard, 2003), il en résulte en effet un consentement à payer moindre des promoteurs pour les terrains où les prélèvements sont effectués. Le coût d'équipements sera alors financé, de facto, par amputation de la valeur marchande des terrains.

La solution la plus courante, car sans doute la plus simple, consiste à faire supporter le financement de l'urbanisation par les budgets publics, et donc par l'ensemble des contribuables locaux, voire nationaux.

---

[46] Bien que grâce à de nombreuses enquêtes socio économiques, on commence à bien connaître, par exemple, les marchés fonciers des bidonvilles, et les logiques économiques de leurs habitants.

[47] En France, la Taxe Locale d'Equipement (TLE) consiste à faire payer au constructeur un pourcentage fixe d'un prix forfaitaire de la construction, réévalué chaque année par le Parlement. C'est donc une composante du coût de l'opération.

[48] Le mécanisme du compte à rebours décrit le calcul effectué par le promoteur pour déterminer son consentement à payer le terrain où il veut réaliser son opération immobilière. La donnée de départ est le prix de marché du produit immobilier envisagé. De ce chiffre, le promoteur déduit l'ensemble des coûts qui s'imposent à lui. Le montant résiduel est la somme qui peut être consacrée au foncier. Pour Renard (Renard, 2003) c'est le mécanisme de base qui permet de comprendre l'articulation des marchés immobiliers et des marchés fonciers.

IV - Conclusions

Ce chapitre a discuté des leviers d'action à la disposition des aménageurs urbains pour placer les transports dans les villes du Sud sur des trajectoires environnementalement soutenables.

Une analyse critique des débats sur la forme urbaine durable idéale qui ont animé l'histoire des théories urbanistiques montre que la recherche de cette forme urbaine idéale est vaine. L'ambition de définir et répliquer dans divers contextes la forme urbaine idéale, limitant les consommations énergétiques liées aux déplacements des citadins, est un projet du passé, s'inscrivant dans un urbanisme des « démiurges » (Haeringer, 2000) dont la « dictature des marchés » (Renard, 2003) a sonné le glas.

Un consensus s'est en effet formé pour reconnaître que les forces du marché sont tellement puissantes en matière d'usage des sols, qu'il est non seulement très difficile, mais inefficace, pour la puissance publique, de s'y opposer frontalement. Au final, la tâche prioritaire n'est donc pas de concevoir une forme de ville idéale mais, plus modestement, d'anticiper et d'accompagner les dynamiques de marché conduisant à la structuration de l'espace urbain, c'est-à-dire d'encadrer le développement urbain spontané.

Compte tenu des conclusions du premier chapitre sur les déterminants des consommations énergétiques et des émissions de CO_2 liées aux transports urbains, cette planification d'anticipation et d'accompagnement se doit d'être centrée sur le fonctionnement du couple « transport – usage des sols ». Nous soutenons alors la thèse d'une nécessaire « prise en tenaille » des consommations énergétiques et émissions de CO_2 liées aux transports urbains par des politiques transports et urbanisme intégrées et complémentaires. Cette tenaille vise d'un coté à accroître l'offre de transport soutenable et de l'autre coté à réduire le besoin de mobilité des citadins. Nous analysons ensuite les différentes politiques envisageables s'inscrivant dans une des deux branches de cette tenaille.

L'analyse des politiques visant à accroître la soutenabilité environnementale de l'offre de transport urbain montre que si les différentes mesures d'amélioration de l'efficacité environnementale des véhicules constituent des opportunités de réduction des consommations énergétiques et émissions de GES liées, leur efficacité pour lutter contre l'effet de serre et infléchir significativement les trajectoires des consommations énergétiques dans les villes du Sud reste très limitée. Leur diffusion est lente et leur potentialité de réduction des émissions de CO_2 insuffisante**.** Ces mesures techniques et réglementaires sont nécessaires mais certainement pas suffisantes pour relever le défi du changement climatique. L'absence de maîtrise de la répartition modale et plus profondément des besoins de déplacement fait que ce genre de mesures n'est pas à la hauteur du défi posé par les dynamiques urbaines au Sud, même avec un prix élevé du pétrole.

La structure urbaine de beaucoup de villes du Sud est heureusement aujourd'hui encore adaptée aux systèmes de transports de masse basés sur des corridors de transit. A la différence des villes dépendantes de la voiture où les activités sont hautement dispersées, les villes du Sud offrent l'opportunité de flux importants de passagers sur des axes de transit et donc la possibilité de développer des Transports Rapides de Masse (TRM). D'un point de vue environnemental, tous les TRM sont avantageux dans la mesure où ils remplacent des déplacements en voiture ou en bus très polluants. Si le rail est en théorie le TRM le plus économe en énergie, le taux d'occupation – et donc les coûts d'investissement, d'opération et de maintenance pour étendre le réseau à l'ensemble de la ville – est cependant un facteur déterminant.

Les politiques visant à réduire la demande de mobilité recouvrent un ensemble de mesures pratiques pour influencer la structuration d'une ville. Tout d'abord l'analyse de ces politiques montre qu'en matière de légalisation et d'enregistrement de la propriété foncière, préalable aux politiques d'usage des sols, il faut faire beaucoup plus simple au prix d'approximations qui se régleront avec le temps. Des techniques simples comme « l'adressage » ont été développées dans ce sens.

Ensuite, si un consensus existe aujourd'hui pour dénoncer l'hypertrophie de la réglementation de l'usage des sols, la nécessité et les modalités de la réglementation de l'usage des sols suscitent de

vifs débats. Il apparaît qu'à la déréglementation pure et simple, il soit préférable de mettre en place des opérations de « production foncière », qui au sens propre « préparent le terrain » à l'urbanisation privée. Par ailleurs, il semble clair que des limites minimum de taille de parcelle et maximum de COS et de densité peuvent être un obstacle à une intensification et une diversification de l'usage des sols en centre ville. Dans des zones à forte accessibilité, modifier ces règlements et adapter les POS afin de faciliter la mixité fonctionnelle permettrait de concentrer les investissements privés et donc les origines et destinations des déplacements quotidiens.

Enfin si les systèmes de taxation foncière et/ou immobilière sont encore difficiles à mettre en place dans les villes du Sud en raison de l'absence et de l'imprécision des cadastres, il existe diverses méthodes visant à faire participer au financement d'une infrastructure publique les propriétaires dont les droits bénéficient d'une appréciation en raison de cette infrastructure.

Au travers de cette tenaille, il s'agit de réduire la demande de mobilité tout en améliorant l'accessibilité aux aménités offertes par la ville et de rendre cette mobilité peu polluante.

Pour conclure ce second chapitre nous souhaitons insister sur deux points qui nous paraissent fondamentaux.

Premièrement, les politiques d'usage des sols, tout comme celles de transports, ne sont que des moyens au service d'objectifs plus larges. Des objectifs politiques clairs et stables concernant « la ville que l'on veut » doivent donc les rendre cohérentes entre elles. Cependant, dans la pratique, il faut constater que les plans d'urbanisme et les plans de transports sont encore le plus souvent élaborés de façon indépendante, sans véritable prise en compte des interactions et même sans objectif commun clairement défini.

Deuxièmement, l'adaptation de ces politiques au contexte local est un élément crucial de l'usage de cette « boîte à outil » dont disposent les aménageurs locaux. Les « cultures » de la planification urbaine sont très différentes d'une région du monde à une autre, avec des difficultés de mise en œuvre souvent liées au rapport à la propriété et à l'autorité publique. Citons par exemple le remembrement foncier qui est très répandu en Asie du Sud-Est et au contraire se heurte à une forte résistance en Amérique latine (Renard, 2001). Un autre exemple est le plan d'urbanisme qui, dans certains pays d'Amérique latine, est « une figure intermédiaire entre la simple explicitation visuelle d'une volonté politique et le pur exercice de rhétorique, perdant ainsi son principe d'action » (Renard, 2001).

Conclusions de la première partie (chapitre 1 et 2)

Les deux chapitres de cette première partie avaient pour objectif de récapituler 1) ce que nous savons aujourd'hui des déterminants des consommations énergétiques et émissions de CO_2 liées aux transports urbains et des évolutions récentes de ces déterminants, et 2) les leviers d'action à la disposition des aménageurs urbains pour placer les transports dans les villes du Sud sur des trajectoires soutenables environnementalement.

Le premier chapitre démontre que l'étude des déterminants des consommations énergétiques des transports urbains ne peut pas se satisfaire d'une approche macro-urbaine centrée sur la densité moyenne et des paramètres « a-spatiaux » tels que la répartition modale des déplacements, le taux de motorisation ou la richesse par habitant. Il est nécessaire d'entrer dans la complexité systémique urbaine et d'analyser la structure spatiale urbaine définie par Bertaud (2001) comme la complémentarité entre la distribution spatiale de la population et la distribution spatiale des déplacements.

Nous concluons alors le premier chapitre sur la nécessité d'une analyse des consommations énergétiques et des émissions de CO_2 liées aux transports urbains, centrée sur le fonctionnement du couple « transport – usage des sols ». Ce couple est au cœur des dynamiques de structuration de l'espace urbain, et par là des consommations énergétiques générées par les transports urbains.

Le deuxième chapitre analyse les leviers d'action à la disposition des aménageurs urbains pour infléchir les trajectoires des consommations énergétiques et émissions de CO_2 des transports urbains dans les villes du Sud. Il démontre que la tâche prioritaire n'est pas de concevoir une forme de ville durable idéale mais, plus modestement, d'anticiper et d'accompagner les dynamiques de marché conduisant à la structuration de l'espace urbain, c'est-à-dire d'encadrer le développement urbain spontané par une planification centrée sur le fonctionnement du couple « transport – usage des sols ».

Nous soutenons alors la thèse d'une nécessaire « prise en tenaille » des consommations énergétiques des transports urbains par des politiques de transports et d'urbanisme intégrées et complémentaires : rendre les véhicules motorisés moins polluants, décourager l'usage des véhicules particuliers, promouvoir des transports en commun efficaces, en particulier des systèmes BRT, adapter les règles d'urbanisme, les POS et COS pour faciliter la concentration des investissements privés dans les zones de forte accessibilité engendrées par la construction d'un Transport Rapide de Masse (TRM), pour diminuer le besoin de mobilité grâce a une densité et une mixité des fonctions plus fortes, favoriser les déplacements non motorisés par un design urbain approprié et l'articulation des divers modes de transport. Cette tenaille vise donc d'un coté à accroître l'offre de transport soutenable et de l'autre coté à réduire le besoin de mobilité des citadins.

Les résultats des analyses développées dans les deux premiers chapitres de cette thèse ouvrent sur trois séries d'interrogations :

1) Comment fonctionne le couple « transport – usage des sols » ? Comment peut-on caractériser la co-détermination du système de transport et du système d'usage des sols ? Quelle est l'articulation entre les marchés foncier et immobilier et le fonctionnement du couple « transport – usage des sols » ? Selon quelle chaîne de causalité l'évolution de ce couple se traduit-t-elle en termes de structuration urbaine ?

Il est en effet nécessaire de mieux comprendre le fonctionnement de ce couple si l'on veut mettre en place une planification d'anticipation et d'accompagnement centrée sur les interactions entre le système de transport urbain et le système d'usage des sols. Encadrer le développement urbain spontané pour l'orienter vers des trajectoires plus de soutenables environnementalement requiert une meilleure compréhension des dynamiques de marché qui structurent l'espace urbain et par là déterminent les consommations énergétiques et émissions de CO_2 liées aux transports.

Ce questionnement fait l'objet de la deuxième partie de cette thèse (chapitres 3 et 4).

2) Existe-t-il des outils d'évaluation (et donc d'aide à la décision) de l'efficacité énergétique des différentes politiques urbaines ? Et si oui lesquels ? Existe-t-il des outils valides, capables de quantifier sur le long terme les effets sur les consommations énergétiques et émissions de CO_2 liées aux déplacements citadins de combinaisons alternatives de politiques transport et urbanisme ?

Parce que les interactions « transport – usage des sols » sont extrêmement complexes, il est en effet nécessaire de disposer d'un outil de simulation des dynamiques de structuration urbaine basé sur une compréhension approfondie des mécanismes de choix de localisations et de transports, pour tester la capacité des politiques présentées dans le chapitre 2 à infléchir significativement les trajectoires de consommations énergétiques liées aux transports urbains.

Cette interrogation fait l'objet du premier chapitre de la troisième partie (chapitre 5).

3) Quelle est l'efficacité énergétique des différents leviers d'action à la disposition des autorités chargées du développement urbain ? Les politiques de transport et urbanisme, mises en œuvre de manière intégrée et complémentaire, permettent-elles effectivement de réduire significativement les consommations énergétiques et émissions de CO_2 liées aux transports urbains ? Quelles doivent être cette intégration et cette complémentarité entre les politiques transport et urbanisme ?

Dans le chapitre 2, nous avons présenté à partir d'une revue critique de l'état de l'art un ensemble de politiques de transport et urbanisme susceptibles d'infléchir les consommations énergétiques dans les transports urbains. Faute d'évaluation quantifiée des effets de ces politiques sur les consommations énergétiques dans la littérature, notre analyse ne permet pas jusqu'ici de répondre à notre question de thèse. Il s'agit donc de mesurer les effets de ces « bonnes politiques » en termes de consommation énergétique et d'émission de CO_2 liées aux déplacements citadins.

Cette question fait l'objet du deuxième chapitre de la troisième partie (chapitre 6).

Partie 2

Chapitre 3 : Les enseignements de l'histoire longue sur les relations fonctionnelles au sein du couple « transport – usage des sols » et leurs conséquences sur l'évolution de la structure urbaine.

Chapitre 4 : Analyse des effets d'une infrastructure de Transport Rapide de Masse (le B.R.T. TransMilenio) sur la structure urbaine.

Introduction de la deuxième partie (Chapitre 3 et 4)

Les conclusions de la première partie nous amènent à centrer cette deuxième partie de la thèse sur l'analyse des relations fonctionnelles entre le système de transport et le système d'usage des sols définissant le couple « transport – usage des sols » et leurs effets sur les dynamiques de structuration urbaine.

Nous appuyons cette recherche sur l'étude d'un cas concret : Bogota, Colombie.

Bogota est une « ville pauvre à croissance démographique rapide ». De plus Bogota est devenue depuis 2001, avec la construction d'un système de Bus Rapid Transit (BRT), la référence en matière de bonnes pratiques dans les transports urbains. Cette expérience colombienne a renouvelé les positions technologiques des institutions internationales.

La ville de Bogota est située au centre du territoire colombien, sur l'altiplano de la cordillère orientale des Andes à une altitude de 2640 mètres au dessus du niveau de la mer. Capitale de la Colombie et ville la plus peuplée, elle concentre en 2004 7.029.928 habitants (Rodriguez, 2006), soit 15,2% de la population colombienne. Sa population croît en 2006 de 3% par an. L'agglomération couvre une aire de 1737 km^2 et présente une des plus fortes densités urbaines d'Amérique latine (3717 habitants par km^2). La majeure partie de l'aire urbaine est plane avec quelques développements urbains sur les flancs montagneux de la partie Sud de la ville. Son PIB par habitant est en croissance (+6,9% en 2006), atteignant USD3.535[49] en 2006 (Camara de Comercio de Bogota, 2006). Bogota génère un quart du PIB national, concentre 20% des emplois 23% de la valeur ajoutée industrielle et 32% de l'activité tertiaire (Camara de Comercio de Bogota, 2006).

Nous étudions le fonctionnement du couple « transport – usage des sols » et ses effets sur les dynamiques de structuration urbaine selon deux approches :

Dans le troisième chapitre, nous analysons **sur le long terme** les liens entre l'évolution du système de transport et celle du système d'usage des sols, et les processus de structuration urbaine engendrés. Nous partons de l'idée que pour saisir les dynamiques de structuration d'une ville, une vision de son développement sur le temps long est indispensable, notamment parce que la distribution spatiale des fonctions urbaines et les infrastructures ont une inertie particulièrement marquée ; les nouvelles dynamiques urbaines sont ainsi fortement déterminées par les précédentes.

Dans le quatrième chapitre, nous analysons **sur le court terme** les effets de l'introduction d'une infrastructure de Transport Rapide de Masse (TRM) sur les systèmes d'usage des sols et de transport définissant le couple « transport – usage des sols » et leurs conséquences sur les dynamiques de structuration urbaine. L'idée est que la perturbation des dynamiques urbaines engendrée par l'introduction d'un TRM révèle des clefs de compréhension des relations fonctionnelles au sein du couple « transport – usage des sols » et nous apporte des enseignements sur la chaîne de causalité entre l'évolution de ce couple et sa traduction en termes de structuration urbaine.

[49] Dollars constants de 1994 (Camara de Comercio de Bogota)

Chapitre 3 : Les enseignements de l'histoire longue sur les relations fonctionnelles au sein du couple « transport – usage des sols » et leurs conséquences sur l'évolution de la structure urbaine

Ce troisième chapitre a pour objectif d'analyser sur le temps long les relations fonctionnelles entre le système de transport et le système d'usage des sols définissant le couple « transport – usage des sols » et leurs effets sur les dynamiques de structuration urbaine.

Nous travaillons sur un exemple urbain concret (Bogota, Colombie) et étudions son histoire urbaine depuis sa fondation en 1538 jusqu'à la fin du 20ème siècle. Ce chapitre s'appuie sur une synthèse critique de diverses sources bibliographiques qui se focalisent sur certains aspects du couple « transport – usage des sols », mais ne les considèrent pas dans leur ensemble.

Nous présentons dans un premier temps les quatre grandes phases de structuration urbaine qui se sont succédées de la naissance de la ville à la fin des années 1990. Plus qu'une succession de structures urbaines forcément en décalage avec la complexité urbaine, nous nous attachons à mettre en avant les aspects dynamiques des processus de structuration de l'espace urbain et à en expliciter les relations systémiques.

La première section analyse **la densification** d'une Bogota coloniale, de forme ovale et compacte car « ceinturée » jusqu'à la fin du 19ème siècle. La ville conserve sa trame hispano-américaine adaptée au site urbain, constituée de rues piétonnes, symétriques non hiérarchisées où l'unique mode de transport est la marche à pied. A cette trame quasi-orthogonale se superpose une organisation socio-économique de l'espace urbain en cercles concentriques.

La seconde section étudie **l'expansion linéaire** de la ville provoquée par la mise en place d'un tramway. L'introduction de la roue dans les transports urbains s'accompagne de transformations importantes de la chaussée. L'axe structurant Nord – Sud se met en place. La ségrégation socio-économique en quartier apparaît. Cette période va de la fin du 19ème siècle au début des années 1930.

La troisième section examine **la polycentralisation** de Bogota provoquée par la progressive suprématie des transports routiers - bus essentiellement mais aussi voiture – au détriment du tramway, suprématie de la route orchestrée par les pouvoirs locaux et en étroite relation avec les stratégies des développeurs urbains privés. La macro-ségrégation socio-économique Nord – Sud, accentuée par la forme linéaire de la ville, se met en place. Cette période s'étale du début des années 1930 aux années 1970.

La quatrième section analyse **la consolidation et la recomposition interne** de la forme et de la structure urbaine héritée. Progressivement le système de transport se sature et la mobilité se dégrade. A cela s'ajoute des évolutions de la planification urbaine et du secteur de la production foncière et immobilière qui engendre une inversion des dynamiques de structuration urbaine passées. Cette dynamique débute dans les années 1970 et se poursuit jusqu'à la fin des années 1990.

Exploitant les bases de données existantes pour cette période, nous étudions dans la dernière sous section de cette quatrième section les liens entre le marché foncier et les marchés immobiliers (locatif, achat-vente neuf et ancien) d'une part et d'autre part les relations fonctionnelles entre ces quatre marchés et les dynamiques de structuration urbaine.

Cette périodisation, élaborée en croisant les différentes propositions rencontrées dans la littérature, est bien entendu d'ordre indicatif. La durée des processus d'évolution est telle qu'ils couvrent des laps de temps importants, supérieurs à une année, et chaque processus découlant des précédents, il y a chevauchement dans le temps entre les dynamiques de structuration urbaine successivement à l'œuvre.

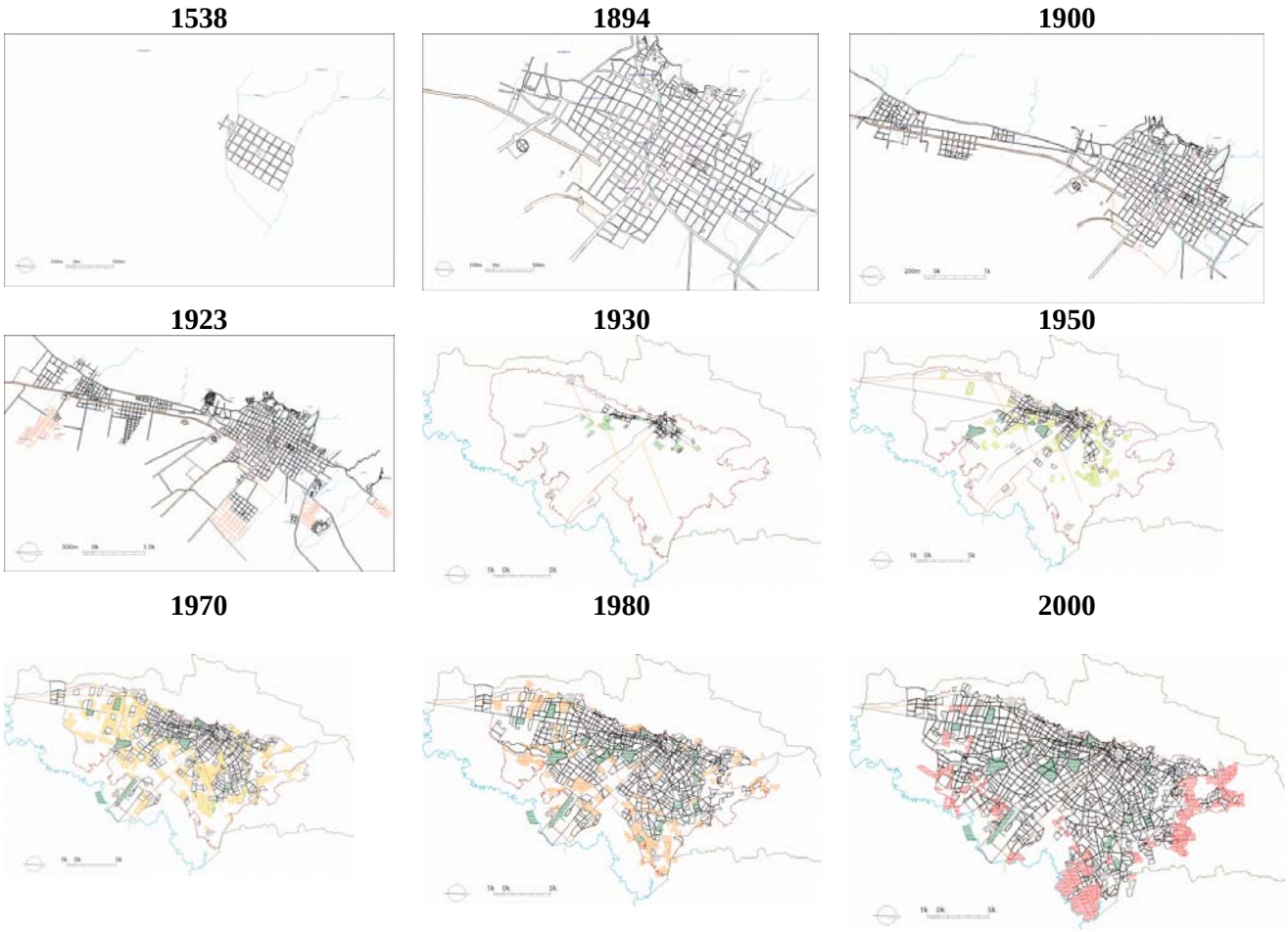
Enfin dans une cinquième section nous discutons les analyses développées à la fin du 20ème siècle sur les causes de la crise de la mobilité et les réponses apportées par les autorités. Alors que les différentes études convergent pour expliquer la progressive congestion de la période 1970 – 2000 par des causes structurelles et institutionnelles, les autorités publiques envisagent et mettent en œuvre des réponses basées sur la construction d'infrastructures de transport.

Tableau 22 : Taux de croissance démographique à Bogota 1870 – 2000

Période	Taux de croissance démographique
1723 - 1870	0,5%
1801 - 1870	1%
1970 - 1905	2,6%
1905 - 1918	2,9%
1918 - 1928	4,9%
1928 - 1938	3,4%
1938 – 1951	5,5%
1951 – 1964	7,4%
1964 – 1973	5,8%
1973 – 1985	3,3%
1985 – 1993	3,3%
1993 - 2006	3%

Source : DANE cité dans (Dureau et al., 2000), (Martinez, Duenas, 2003), (Rodriguez, 2006)

Carte 3 : Evolution de la forme urbaine de Bogota. 1538 – 2000.



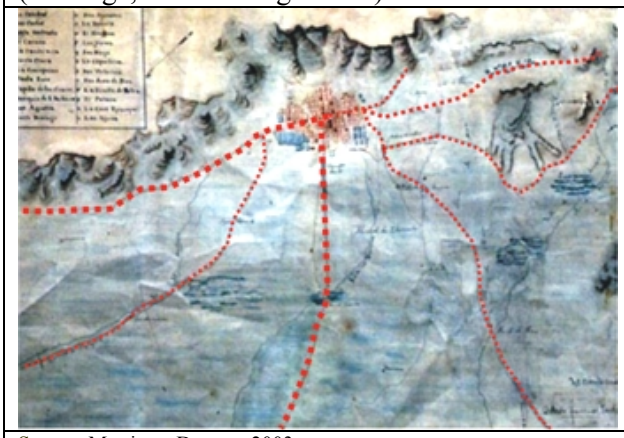
Source : Consultoría Plan Centro, IDOM-CORPORACION UNIVERSIDADES DEL CENTRO-DAPD

I - 1538 – 1900 : Bogota sans transport urbain, une ville dense et concentrique

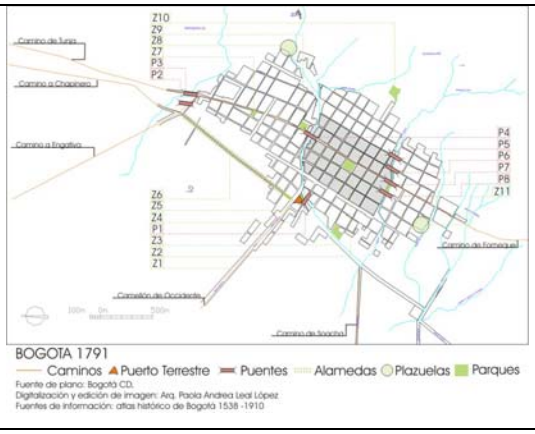
A - *La trame viaire, héritage du modèle hispano-américaine adaptée au site urbain*

Santa Fe de Bogota fut fondée en 1538 au croisement des rivières San Francisco, San Augustin et San Diego sur un territoire occupé par les indiens Muisca. Les Muisca avait établi un réseau de routes commerciales reliant les différents centres urbains ; ces routes furent utilisées par les espagnols pour la conquête, pour l'importation et l'exportation des marchandises mais aussi lors de l'établissement des centres urbains, dont Santa Fe de Bogota. **La trame urbaine résultait ainsi de la conjugaison des axes de communication Muisca et du modèle urbain de la conquête espagnole consistant à tracer des rues perpendiculaires** (« *calle* » orientée est – ouest, « *carrera* » orientée sud – nord). Ces axes Muisca de communication entre la ville et l'extérieur se convertiront au fil du temps en axes principaux d'expansion urbaine.

Carte 4 : Plan de Santa Fé de Bogota et ses environs en 1797.
(en rouge, les voies régionales)



Carte 5 : Bogotá 1791



Source: Martinez, Duenas, 2003

Ainsi ce modèle viaire orthogonal, traditionnel de la « *conquista* » espagnole, fut déformé par le réseau de chemin muisca préexistant, et les rares obstacles topographiques et hydrographiques du site.

B - *La voirie inadaptée aux véhicules*

La trame viaire était constituée de rues non hiérarchisées, de 10 mètres de large, sans trottoir ni recouvrement de la chaussée. Les rues n'étaient utilisées que par les piétons et les quelques animaux transportant des marchandises. Seules quelques rues étaient pavées, voire plantées d'arbres, mais ces actions ponctuelles répondaient plus à l'imaginaire urbain de ses habitants qu'à une volonté d'amélioration technique. Le pavement permettait de délimiter clairement ce qui était « urbain et civilisé » de ce qui était « rural et sauvage » (Martinez, Duenas, 2003). **Le mauvais état de la chaussée est à relier à sa non-utilisation pour le passage de véhicule** : il constitue en effet un facteur rendant difficile l'introduction et l'utilisation de véhicules à traction jusqu'à la fin du 19ème siècle, et réciproquement la très faible demande en transport intra-urbain explique que l'on n'ait

jamais cherché à améliorer l'état des chaussées. On considère que 8,5% de la superficie urbanisée était consacrée à l'espace public, essentiellement la voirie urbaine. (Montezuma, 2000)

C - *La distribution concentrique des populations et des activités*

L'organisation socio-économique de l'espace urbain s'articulait autour d'un noyau central – la future place Bolivar – où étaient localisées les fonctions politiques, administratives supérieures et commerciales – le commerce de luxe essentiellement. Les résidences des populations aisées, maisons de grande taille d'un ou deux niveaux, coïncidaient avec ce noyau central, en débordant un peu autour.

Les secteurs populaires se situaient en périphérie de ce noyau central. Les logements étaient plus précaires et équipés de façon plus élémentaire ; la régularité du tracé orthogonal s'estompait fréquemment. Progressivement, les quartiers pauvres entourèrent la ville, formant ainsi une véritable ceinture de pauvreté. La précarité était particulièrement marquée sur le bord Est de la ville. Si Bogota se situe sur une plaine opposant peu d'obstacles naturels aux premières expansions dans les autres directions, la ville est adossée à l'Est sur la cordillère des Andes dont les contreforts rendent difficiles les établissements humains. Contraintes dans leur localisation résidentielle, les populations très pauvres se concentraient dans cette zone Est délaissée, ce qui posait des difficultés fonctionnelles graves : ces secteurs populaires, dépourvus d'eau courante et de tout-à-l'égout contaminaient les sources d'approvisionnement de la ville. Cependant tous les groupes populaires n'habitaient pas en périphérie. Un nombre important partageait l'occupation de la zone centrale avec les groupes riches : le contingent considérable d'employés de maison occupait les mêmes bâtiments que leurs patrons ; de plus, de nombreux artisans exerçaient leurs activités de production et de services dans les locaux exigus, généralement au rez-de-chaussée de grands immeubles, où ils combinaient travail et logement.

Les activités industrielles, en nombre réduit, se situaient également en périphérie, mêlées aux zones d'habitation populaire. Progressivement, avec l'extension du centre civico-administratif vers l'ouest, le long d'une des voies importantes qui unissait Bogota à l'ouest du pays et notamment au fleuve Magdalena[50], s'est développée une zone d'activités utilitaires : les halles, l'abattoir et un florissant commerce de détail pour les classes populaires.

Ainsi la ville était entourée d'une ceinture de résidences pauvres et d'activités de production.

L'existence d'un petit centre urbain secondaire, Chapinero, à six kilomètres au nord de la ville, le long de l'autre grande voie de communication avec l'est du pays, constituait une anomalie dans cette répartition schématique. A l'origine, c'était une petite agglomération de résidences secondaires champêtres ; avec le temps se sont installés des habitants des classes aisées. A la fin du 19ème siècle, une ligne de tramways à traction animale, électrifiée au début du 20ème siècle, unit Chapinero au centre de la ville. Comme nous le verrons par la suite, cette ligne aura des conséquences majeures sur la forme et la structure urbaines du début du 20ème siècle.

D - *Absence de transport intra-urbain, développement des transports inter-urbains*

La marche à pied constituait le mode de déplacement urbain majoritaire jusqu'à la fin du 19ème siècle. Etant donné les faibles distances à l'intérieur de l'espace urbain, le mauvais état de la chaussée et la faible mobilité du fait de l'organisation socio-économico-spatiale en cercles concentriques et de la compacité de la ville, les véhicules à traction animale introduits à la fin du 19ème siècle n'étaient pas indispensables aux déplacements intra-urbains des personnes. Peu avant la construction du tramway en 1884, différents types de véhicules de transports de passagers (berlines, victorias, carrosses, …) circulaient déjà. Mais tous étaient destinés au transport inter-urbain, reliant Santa Fe de Bogota aux différents centres urbains environnants. La plupart du temps ce service était fourni par des compagnies étrangères.

[50] Un des principaux axes de communication jusqu'à la deuxième moitié du 20ème siècle.

Le premier tramway privé à traction animale fut mis en circulation le 24 décembre 1884. Son parcours était d'un peu plus de 6 km entre la future place Bolivar de Bogota et l'urbanisation périphérique de Chapinero. Une seconde ligne vers l'ouest, reliant Bogota à Facatativa, fut inaugurée en 1889. Les véhicules, d'une capacité de vingt personnes, roulaient sur des rails de bois recouverts de métal et étaient tirés par des mules. Le prix du trajet, 2 centimes, était bien inférieur aux autres modes de transports de l'époque. Les experts s'accordent pour considérer que le tramway correspondait plus à un souci de créer une image moderne de la ville qu'à un souci technique de transport inter-urbain. Pour la classe dirigeante du pays et de la ville, le tramway était symbole de développement, de progrès technologique et une manière appropriée de se lancer dans le nouveau siècle. Les journaux commentaient l'importance pour Santa Fe de Bogota de développer un moyen de transport moderne à l'instar des grandes capitales du monde[51].

Photo 8 : Tramway à traction animale sur la route du centre vers Chapinero - 1895



Source: Bogotá CD

E - *La dynamique de densification*

L'extrême **faiblesse de l'industrie de la construction** a joué un rôle important. L'essentiel de la construction résidentielle se faisait selon deux méthodes : l'auto-construction dans les secteurs populaires et la construction sur commande pour les classes plus riches. Les deux modalités offraient un caractère d'atomisation qui rend difficile l'intégration d'une quelconque planification urbaine. L'expansion graduelle, terrain par terrain, liée à ce type de production se heurtait à un anneau d'habitations populaires et d'activités industrielles qui constituaient alors une barrière difficile à franchir. De plus la concentration de la propriété des terres périphériques par des grands propriétaires de tradition agricole et peu intéressés par les projets immobiliers urbains constituait une seconde barrière à l'expansion urbaine. Enfin les difficultés des autorités locales à fournir les réseaux et infrastructures à des zones d'expansion et les alliances entre ces autorités locales et les propriétaires terriens de la périphérie agricole ne fournissaient aucune incitation à une planification s'opposant aux tendances spontanées. Ainsi **ces deux anneaux** – secteurs populaires et industriels puis grandes propriétés agricoles - **bloquaient l'offre foncière nécessaire à une extension urbaine**. La ville se densifiait alors par subdivisions répétées des parcelles[52].

Le rythme d'accroissement démographique s'accélère à partir de la fin du 19ème siècle : 3.000 habitants en 1670, 20.000 en 1723, 21.000 en 1801, 40.000 en 1870, 84.700 en 1881, 100.000 en 1905, soit un taux annuel de 2,65% sur la période 1870 – 1905 contre un taux de 0,47% sur la période 1723 – 1870 et 1% sur la période 1801-1870. Mais comme la surface urbanisée croît à un rythme sensiblement moindre, l'accroissement de la densité est appréciable : en 1786, la densité brute par hectare est de 106 habitants, en 1890 elle est de 413 hab/ha (Martinez, Duenas, 2003)

[51] Le contrat de concession signé avec le consul des Etats-Unis spécifiait que le service serait de « Ferrocarriles urbains similaires au système utilisé dans la ville de New York » Registre Municipal 22 juin 1888, cité par Martinez et Duenas (Martinez, Duenas, 2003)

[52] La production en hauteur était relativement peu significative.

Ainsi pendant quatre siècles, **la forme urbaine dense et compacte, et l'organisation socio-économique de l'espace urbain en cercles concentriques** – deux caractéristiques liées aux barrières à l'extension urbaine, à la faiblesse de la planification urbaine et à l'inexistence d'une industrie immobilière - **ont limité la demande de mobilité et les autorités locales n'ont pas investi dans le développement du système de transport urbain**. Nous retenons également pour notre recherche des paramètres intervenant dans les relations fonctionnelles au sein du couple « transport – usage des sols » **l'importance de la géographie physique du site** (Cordillère des Andes à l'Est et plaine sans obstacles naturels dans les autres directions) **et de l'héritage urbain** laissé par les Muisca puis par la conquête espagnole.

Encadré 11 : Production immobilière « sur commande », promotion immobilière « capitaliste », l'« auto-construction », production étatique.

La logique du promoteur capitaliste est strictement mercantile : il fait l'acquisition d'un terrain constructible et y bâtit des édifices qu'il met en vente.
Dans la production sur commande, le promoteur n'a pas à investir de capital : le futur usager du logement acquiert le terrain, apporte le capital pour la construction et charge le promoteur de réaliser uniquement la construction du logement.
L'auto-construction est le mode de production illégale de logement le plus répandu à Bogota, elle fonctionne au travers de ce qui est appelé localement l' « *urbanization pirata* » (lotissement pirate) : les agents opérant sur ce marché acquièrent des terrains dans des zones non-constructibles et les lotissent pour les vendre sans titre légal de propriété, sans dotation de services ni infrastructures, à des familles à faibles revenus.
La production étatique a comme but de permettre l'accès au logement au plus défavorisés, en construisant le logement, soit directement soit sur commande.
Source : Dureau et al., 2000.

II - 1900 – 1930 : L'ère du tramway et l'expansion linéaire

A - *L'apparition de la roue dans les déplacements*

1) Les transports en commun

Au début du 20ème siècle, les lignes de tramway furent électrifiées et le bois des rails fut remplacé par du métal. Le succès initial du tramway sera cependant remis en cause par la dégradation du service dans les années 1930. La forte fréquentation et l'absence d'entretien des voies comme des wagons entraînèrent de multiples avaries, un allongement du temps de trajet et la multiplication des accidents.

Photo 9 : Tramway électrique sur la Calle 26 - 1910



Source: Bogotá CD

Suite à la déclaration d'indépendance du Panama en 1905, soutenu par les Etats-Unis, le mécontentement de la population colombienne se traduisit par un boycott du tramway géré par une entreprise américaine, The Bogota Railway Compagnie (BCR). D'autre part, les actionnaires américains, cherchant à maximiser rapidement leur retour sur investissement, s'opposaient à l'extension du service. Pour ces deux raisons, la municipalité racheta en 1910 l'entreprise et la rebaptisa Tranvia Municipal de Bogota (TMB). La municipalité étendit le service aux secteurs Sud, plus pauvres de la ville : en 1916, le tramway desservit San Cristobal et en 1918 Yomasa (Martinez, Duenas, 2003).

Les premiers autobus apparaissaient dans la deuxième moitié des années 1920. Importés des Etats-Unis, ils furent d'abord achetés par la Compagnie du Tramway. Ce n'est que dans les années 1930 que des entreprises de bus commencèrent à offrir un service de transport en commun autonome (Martinez, Duenas, 2003).

Photo 10 : Autobus de Bogota - 1926



Source: Bogotá CD

A cette époque fut développé un réseau de voies ferrées à l'échelle régionale. Le train reliait Bogota avec les autres centres urbains de l'altiplano : Facatativa à l'ouest, Soacha et Sibaté au Sud et Zipaquira au nord. Ce réseau ferroviaire constitue le premier pas de la progressive métropolisation de Bogota (Montezuma, 2000).

2) Les transports individuels

Durant les trois premières décennies du 20ème siècle, la marche à pied restait le moyen de déplacement majoritaire. Cependant, petit à petit, les carrosses et les voitures ont fait leur apparition. Les premières voitures apparaissent en 1905 ; elles constituaient essentiellement des objets ostentatoires signifiant l'entrée dans le nouveau siècle des familles riches. En 1910, leur nombre était estimé à 100 voitures (Puyo, Zambrano, Vargas, 1988). Les premiers services de transport individuel –

location de voiture avec chauffeur – apparaissaient à cette époque. Organisés par des compagnies étrangères, ils restaient un mode de transport de luxe, et constituaient une réponse aux fréquentes avaries du tramway et à l'expansion de la ville vers le nord.

3) Premières interventions municipales

Le début du 20ème siècle marque les premières interventions municipales sur l'organisation de l'espace urbain. Les services publics – éclairage urbain, électrification des foyers, adduction et assainissement, télégraphe – furent largement améliorés ou créés. **Mais les principales actions des pouvoirs locaux se concentrèrent sur l'aménagement de la voirie et son adaptation aux nouveaux modes de transport.** Les chaussées furent pavées, voire recouvertes de macadam dans le centre à partir de 1910 ; les premiers trottoirs font leur apparition, partageant l'espace entre les piétons et les voitures. De même la construction d'avenue – sur le modèle haussmannien, mais sans la rénovation des façades - fut une des activités prioritaires des gouvernements municipaux et nationaux. En 1902, la municipalité publia la première norme urbanistique ; celle-ci proposait une hiérarchisation des voies urbaines. Ce décret fut renforcé en 1914 octroyant à la municipalité un droit d'expropriation pour construire des voies (Jaramillo, 1979). En 1912, la municipalité créa le premier règlement pour les automobiles et un service spécial en charge du contrôle de la circulation. Compte tenu de ces changements, l'espace public passait de 8,5% à 10% de la superficie urbanisée (Montezuma, 2000).

B - *Une nouvelle dynamique d'urbanisation : l'expansion linéaire*

Les premières interventions municipales sur - le développement des services publics en général, l'amélioration des chaussées- et le développement d'un tramway engendrèrent les plus importantes mutations de l'organisation spatiale qu'avait connu Bogota depuis sa fondation. Ces infrastructures constituèrent le moteur d'une expansion sans précédent dont l'axe principal fut la ligne de tramway Nord – Sud reliant Bogota à Chapinero (puis à San Cristobal et Yomasa au sud). La ville put enfin sortir de ses « murailles ». La connection du centre de Bogota avec Chapinero convertit ce « satellite » de résidences secondaires en un quartier de Bogota (Montezuma, 2000). Ainsi Bogota cessa d'être une unité urbaine compacte et isolée de son territoire par une ceinture de grandes propriétés agricoles pour se convertir en une «ville moderne» d'expansion linéaire.

Carte 6 : Lignes du tramway. Expansion linéaire de Bogota vers Chapinero - 1913



Source: DAPD

La relation formelle et fonctionnelle que permit le tramway fit que, rapidement, le centre et le petit noyau urbain périphérique du nord se convertirent en une seule zone urbaine linéaire, plus dispersée et de densité plus faible. Alors que la population passait de 100.000 habitants en 1905 à 330.213 habitants en 1938 (soit un taux de croissance de 3,7%), l'introduction du Tramway fit que Bogota bascula d'une ville dense, concentrique et compacte—413 habitants par hectare en 1890— vers une ville linéaire, atomisée et moins dense —132 habitantes par hectare en 1938 (Montezuma, 2000).

Ainsi **l'introduction de la roue dans les déplacements urbains eut des effets considérables sur la forme et la structure urbaine**. La construction du tramway, au départ essentiellement pour symboliser la modernité d'une élite, rompt les barrières entourant Bogota depuis quatre siècles et génère une expansion linéaire de la ville. L'apparition de la voiture particulière et des autobus motive les premières interventions des autorités locales sur l'espace urbain. C'est à cette époque que se mirent en place les principales caractéristiques et acteurs des dynamiques urbaines de Bogota du 20ème siècle : l'axe structurant Nord – Sud qui deviendra le premier corridor des déplacements urbains et la colonne vertébrale de la ségrégation sociale, le quartier comme nouvelle typologie urbaine avec la distinction entre les quartiers ouvriers, pauvres et les quartiers résidentiels, riches, et les nouveaux acteurs des mutations spatiales, aussi bien publics que privés. Alors que depuis la fondation de Bogota les activités agricoles apparaissaient aux propriétaires fonciers bien plus importantes que les projets urbains, c'est à cette époque aussi que se développe une dynamique de marché dans le foncier de la périphérie urbaine. Ainsi **les aspirations des élites urbaines, les investissements dans les infrastructures massives de transports, les interventions des pouvoirs locaux sur l'espace urbain et les évolutions des marchés fonciers apparaissent reliés entre eux et déterminants dans les relations fonctionnelles du couple « transport – usage des sols ».**

III - 1930 – 1970 : progressive suprématie de la route, polycentralisation de Bogota

La période 1930 -1970 correspond aux phases de plus fortes croissances démographiques de la ville. Les rythmes d'accroissement sont vertigineux : 3,44% par an entre 1928 et 1938, 5,5% par an entre 1938 et 1951, 7,4% entre 1951 et 1964 et 5,8% entre 1964 et 1973. (Martinez, Duenas, 2003). La population de Bogota passe ainsi de 235.421 habitants en 1928 à 330.312 habitants en 1938, 1.500.000 habitants en 1964 et 2.861.000 en 1973 (Renard, 1994 ; Dureau, 2000 ; Martinez, Duenas, 2003)

A - *Les transports urbains : concurrence bus – tramway et consolidation de l'automobile*

1) Transport en commun : l'origine d'un système de bus privé et la concurrence au tramway

Au milieu des années 1920, le tramway municipal se limitait au périmètre interne de la ville, possédait une trentaine de véhicule, un réseau de 20 km de rail et était l'unique mode de transport en commun pour une population de 150.000 habitants (Martinez, Duenas, 2003). L'extension urbaine rapide et incontrôlée dès la fin des années 1920 et l'établissement de quartiers populaires le long des lignes du tramway – sur une largeur de 2 à 4 km – ont favorisé l'introduction des premiers services de bus. La première compagnie privée de bus fut créée en 1926, mais fut interdite suite aux pressions des dirigeants du tramway. En 1934, se formèrent les premières coopératives autorisées de transport en commun de bus, administrées par le secteur privé. Jusqu'à la disparition du tramway en 1954, la concurrence entre tramway et bus fut rude. A la fin des années 1920, l'entreprise du tramway tenta même d'établir son propre service de bus (Martinez, Duenas, 2003).

Dès les années 1940, les compagnies privées de bus commençaient à imposer leur suprématie : le nombre de bus augmentait de 200 à 1522 entre 1931 et 1949, alors que le nombre de tramway diminuait sur la même période de 73 à 65 (Martinez, Duenas, 2003).

Tableau 23 : La progressive suprématie du bus sur le tramway

Evolution du nombre de bus et du nombre de tramway

AÑO	N° BUS.	N° TRAN.
1917	-----	14
1921	3	29
1922	------	41
1926	22	-----
1931	200	73
1936	------	87
1941	500	95
1948	------	90
1949	1522	65

Evolution de l'aire de chalandise des compagnies de bus et du tramway par rapport à la superficie de la ville

AÑO	SUPERFICIE CIUDAD KM	CUBIERTA BUSES	CUBIERTA TRANVÍA
1936	25.7	21.0	22.3
1948	39.3	38.2	31.5

Source : Zambrano, 1994

Les premières entreprises de bus s'organisèrent rapidement en syndicat des propriétaires de bus, lesquels devaient acheter une quantité d'actions proportionnelle au nombre de véhicules possédés. De plus ils devaient payer mensuellement par véhicule roulant un droit d'utilisation des itinéraires, propriété du syndicat. En contre partie, les syndicats possédaient et administraient les itinéraires, négociaient avec les autorités locales et nationales, et commercialisaient les combustibles, les huiles, les pièces détachées, etc (Ardila, 2004).

Les émeutes du 9 Avril 1948 – « *El Bogotazo* » - à la suite de l'assassinat du caudillo libéral Jorge Eliécer Gaitan portèrent le coup fatal au tramway : 34 des 99 tramway furent détruits et 2,5 km (2%) de rail arrachés. Le tramway fut définitivement démantelé en 1952 (Martinez, Duenas, 2003). Cependant tous les experts s'accordent à dire que si le *Bogotazo* porta le coup fatal, la sentence était déjà prononcée : il n'y avait **aucune volonté politique de combattre l'image d'obsolescence du tramway** colportée au niveau local comme international par les compagnies de bus émergentes ; les dirigeants politiques étaient bien plus intéressés à protéger la croissance du parc autobus des coopératives (entente au niveau local avec les compagnies privées et au niveau international, les bus étant importés des Etats-Unis) (Montezuma, 2000).

Photo 11 : Tramway en feu lors des émeutes du 9 Avril 1948



Source: Bogotá CD

La compagnie publique de tramway se reconvertit en une entreprise publique de transport urbain, la « *Empresa Distrital de Transporte Urbano* » (EDTU), offrant un service de tramway mais aussi d'autobus et de trolleybus. L'EDTU eut beaucoup de difficultés à concurrencer les compagnies de bus privées –les fréquentes coupures de courant détériorèrent fortement la qualité du service des trolleybus - et fut liquidée dans les années 1970. L'évolution des part de marchés est significative : au début des années 1950, les compagnies de bus privées satisfaisaient 25% des déplacements avec une dizaine de coopératives, 20 itinéraires et 100 véhicules ; entre 1957 et 1967 leur part de marché passèrent de 62% à 92% et en 1973, la vingtaine de coopératives avec 2600 véhicules et 229 itinéraires couvraient 95% des déplacements (Martinez, Duenas, 2003).

2) Transport individuel : la rapide émergence de l'automobile

L'automobile fut introduite tardivement à Bogota. Ce n'est qu'en 1905 que le président Nunez circula à bord de la première automobile. Mais du fait du prestige puis de la flexibilité qu'elle offrait, et du soutien constant qu'elle reçut des administrations et qui se traduisit non seulement dans l'aménagement des voies mais dans les objectifs de la planification urbaine**, la voiture connut un essor continu et rapide.**

Tableau 24 : Evolution du parc automobile 1912 – 1950

Année	Nombre de voiture	Taux de croissance annuel
1912	103	
1918	150	7,6
1923	360	28
1926	892	49,3
1927	1100	23,6
1940	4.899	26,4
1941	7.764	58,4
1950	11.884	5,9

Source : Zambrano, 1994

B - *Une nouvelle dynamique d'urbanisation : atomisation et polarisation*

1) Urbanisation en discontinuité physique et polarisée

A partir des années 1930, de nouveaux modes d'expansion de l'espace urbain bouleversèrent les dynamiques d'urbanisation et de structuration urbaine de la phase précédente. En parallèle de l'agrandissement graduel et continu de la ville par prolongement de la trame orthogonale traditionnelle, se développait une urbanisation hors de l'agglomération consolidée et en discontinuité physique avec celle-ci. Dans les années 1930 apparaissaient des lotissements périphériques[53] dont le développement fut impulsé par des « parcelliseurs » de terrains. Ceux-ci vendaient à l'unité les parcelles de terrain qui étaient ensuite bâtis par les acheteurs individuellement, auto-construction pour les populations pauvres, construction sur commande pour les populations riches (Cuervo, Jaramillo, 1987).

L'activité des « parcelliseurs » s'amplifia progressivement. Dès la fin des années 1960, avec l'émergence d'une classe moyenne et la création d'un système financier spécialisé dans le secteur immobilier - dont le pilier central était la Banque Centrale Hypothécaire (BCH) – les principaux

[53] « *conjuntos* » (ensembles), « *barrios* » (quartiers) et « *urbanizaciones* » (lotissements)

« parcelliseurs » sont devenus des promoteurs de logement : leur action ne se limitait plus à la vente des lots, elle s'étendait à la construction (Cuervo, Jaramillo, 1987). Ces nouveaux promoteurs immobiliers se concentraient sur les classes moyennes (les élites ne faisaient pas – pas encore - appel aux promoteurs capitalistes mais à la production sur commande) et il s'agissait généralement de logements en série, de hauteur limitée, dans les zones périphériques (Cuervo, Jaramillo, 1987).

Une importante production immobilière était aussi directement effectuée par différentes agences de l'état. La plus importante, l'Institut de Crédit Territorial (ICT), tenta de répondre à la demande des groupes à faible revenu dont les conditions de logement s'étaient fortement dégradées, ce qui avait donné lieu à une expansion alarmante des quartiers irréguliers clandestins. Cependant l'action des promoteurs publics n'atteignait généralement pas les niveaux les plus bas de l'échelle des revenus (Arango, 2001) ; par contre leurs impacts sur les secteurs moyens – bas des ouvriers formels et des employés furent appréciables (Cuervo, Jaramillo, 1987).

Dans un premiers temps les quartiers ouvriers et les quartiers résidentiels des populations aisées apparaissaient dans toutes les directions d'expansion de la ville. Mais peu à peu ces établissements périphériques acquirent une distribution socio-spatiale définie et accompagnèrent la macro-ségragation progressive de la ville consolidée. Ainsi les établissements périphériques légaux comme illégaux renforcèrent la bipolarité sociale de Bogota : les quartiers et lotissements périphériques des populations riches se concentrèrent au Nord de Bogota, les quartiers lotissements périphériques des populations pauvres au Sud.

Cette **intensification de la promotion immobilière et l'émergence d'une urbanisation en discontinuité physique avec l'agglomération consolidée** se produisirent simultanément à une accélération sans précédent du rythme de croissance démographique : 5,5% par an entre 1938 et 1951 (Martinez, Duenas, 2003).

2) La localisation résidentielle des classes moyennes et riches et l'érosion progressive du centre

A partir des années 1950, alors que l'accroissement démographique de la ville continuait à un rythme vertigineux (7,4% par an entre 1951 et 1964 ; 5,8% par an entre 1964 et 1973) (Martinez, Duenas, 2003), l'émergence d'une classe moyenne importante et l'évolution des choix de localisation résidentielle des classes moyennes et riches modifièrent la répartition socio-spatiale.

Alors que son poids relatif était restreint au cours des époques précédentes, la constitution d'une classe moyenne nombreuse est un paramètre important de l'évolution de la structure urbaine car cette population forgea son propre modèle de localisation résidentielle : chercher à se démarquer des groupes populaires et à se rapprocher de populations supérieures en acquérant les résidences délaissées par les plus riches ou les logements neufs produits par les promoteurs légaux ou illégaux. Ainsi **la classe moyenne s'installait près des quartiers riches, occupait les zones abandonnées par les élites ou s'établissait dans des lotissements périphériques atomisés**. Cette stratégie de la classe moyenne accompagnait – et dans une certaine mesure permettait, puisque la classe moyenne achetait les maisons des plus riches – la naissance d'un **nouveau comportement de localisation résidentielle chez les populations aisées : leur migration itérative vers le Nord**, déplaçant ainsi les noyaux de connotation sociale supérieure du centre et de Chapinero à la calle 72, au quartier El Chico, puis à la carrera 15 – avenida 19/ calles 116 – 127[54] (Cuervo, Jaramillo, 1987). Cette migration résidentielle vers le Nord des populations aisées est une caractéristique fondamentale des dynamiques urbaines de la fin de la période 1930 – 1970. Si tous les auteurs s'accordent sur son importance, il est regrettable de ne pas disposer d'études quantitatives.

Au commencement, ces évolutions n'étaient pas incompatibles avec le fait que le centre traditionnel resta le siège privilégié des groupes dominants, cependant graduellement se produisit une **érosion du centre ville** due à l'exode croissant des population aisées vers les quartiers nord. Ce processus fut accéléré par les troubles qui affectèrent Bogota en 1948 (2000 à 3000 morts)[55], causant

[54] Les numéros des calles, orientées Est – Ouest, augmentent du Sud vers le Nord.

[55] Le Bogotazo

des destructions physiques dans le centre ville et suscitant la panique au sein des populations riches. Ainsi si le centre traditionnel continuait à concentrer une part élevée de l'activité économique et des emplois de l'agglomération, sa primauté s'estompa et divers sous-centres spécialisés en différentes fonctions, travaillant en rapport avec lui, unis à lui par des artères viaires mais séparés spatialement se formèrent. Des sous-centres commerciaux et tertiaires supérieurs s'affirmaient au Nord : Chapinero, Avenida Chile, Chico. Vers l'Ouest se consolidaient plusieurs sous-centres spécialisés dans les activités tertiaires et administratives : centro Internacional (calle 26 / carrera 13), centro administrativo Nacional (calle 26 / carrera 50), les parcs et centres sportifs et commerciaux de El Salitre (calle 63 / Avenida 63). Vers le Sud-Ouest les centres industriels de Puente Aranda, Cazuca et Soacha Sibaté s'étaient déjà pleinement consolidés.

Ces évolutions ont donc graduellement mis en place une organisation fonctionnelle polycentrique.

3) Localisation industrielle

Dans le prolongement des activités utilitaires (les halles, l'abattoir, des commerces de détail pour les classes populaires) établis dès la fin du 19ème siècle, **le développement industriel durant cette période se concentra dans l'Ouest de Bogota**. Ainsi des opérations foncières similaires aux opérations résidentielles des « parcellisateurs » mais visant cette fois les activités industrielles se développèrent dès les années 1930 dans la périphérie occidentale de la ville, prolongeant le caractère de zone d'activité le long de la voie interrégionale. Dans ce secteur Ouest se consolidait une zone industrielle qui se maintiendra et attirera pendant plusieurs décennies le développement des industries à Bogota (Cuervo, Jaramillo, 1987).

4) Alliance stratégique entre les développeurs urbains et les entreprises d'autobus

Cette urbanisation dispersée et hors de la ville linéaire de quartiers ouvriers, pour la majorité de façon illégale, est certainement le résultat d'une alliance stratégique entre les promoteurs illégaux et les compagnies d'autobus (Cuervo, Jaramillo, 1987). Le succès commercial des lots nouvellement parcellisés dépendait de la présence d'un service de transport. De fait les services de transports collectifs ont accompagné cette urbanisation, déplaçant leurs terminaux au fur et à mesure de la dispersion urbaine. Réciproquement, l'origine du système d'autobus est étroitement liée à la création de zones de chalandise nouvelles - les districts d'ouvriers – dispersées et hors de la ville linéaire. Faute d'une extension accélérée de son réseau, le tramway perdit la capacité d'orienter les expansions spatiales et il lui était impossible de suivre l'urbanisation sur tous les fronts. Au contraire, le système de bus possédait une grande flexibilité d'organisation et de gestion, et son réseau pouvait s'adapter facilement aux évolutions d'une urbanisation accélérée.

Ainsi **le système de bus s'est converti en un élément indispensable pour le processus d'expansion de Bogota** qui passa de 150.000 habitants sur 1.300 hectares en 1918 à 2,86 millions d'habitants sur 3.121 hectares en 1973 (Dureau, 2000 ; Martinez, Duenas, 2003). **En retour cette urbanisation accélérée, en augmentant l'espace urbain et donc la nécessité de se déplacer, fut un moteur essentiel pour le développement d'un système de transport collectif basé sur le bus**.

Quatre phénomènes majeurs résultèrent de ces nouvelles dynamiques d'expansion et de structuration spatiale caractéristiques de la période 1930 – 1970 (Cuervo, Jaramillo, 1987) :

- un **étalement urbain** significatif, accompagné d'une **baisse de la densité urbaine moyenne** : en 1973, Bogota est 12 fois plus étendue qu'en 1938, alors que dans le même temps sa population est multipliée par 9 (Dureau, 2000) ; la densité de population atteint au début des années 1970 son niveau le plus bas de toute son histoire, passant en dessous du seuil de 100 hab/ha alors qu'elle était de 130 hab/ha en 1938 (Dureau, 2000) ;
- une **structure polycentrique ;**
- une **double dichotomie** de l'espace urbain :

- entre la ville compacte et cette nouvelle périphérie d'expansion en discontinuité physique avec l'agglomération ;
- entre les «quartiers résidentiels» destinés aux populations riches et les «quartiers ouvriers» destinés aux populations pauvres.

- une **macro-ségrégation** urbaine avec les quartiers résidentiels des classes aisées se concentrant sur le front Nord, les quartiers pauvres au Sud. Cette bipolarité, accentuée par la forme linéaire de la ville, est un élément structurant de Bogota que l'on observe encore actuellement.

C - *Réponses des pouvoirs municipaux à l'explosion physique de la ville*

Les premiers efforts de planification urbaine, au-delà de la programmation de la fourniture de services urbains (eau, assainissement, électricité, éclairage) et de la voirie amorcée au début du 20ème siècle, **remontent au début des années 1930** (Renard, 1994). La volonté planificatrice fut constante jusqu'à la fin des années 1970. La production soutenue de plans et de lois en témoigne. **Pourtant l'explosion physique** vécue par Bogota durant la période considérée – tant dans la superficie que dans la forme de l'expansion urbaine – **dépassait la capacité de régulation des autorités**. « L'écart entre la codification du jeu foncier précise, voire sophistiquée, qu'il s'agisse des règles du Code civil ou du droit de l'urbanisme et de la construction, et les pratiques des acteurs est particulièrement visible » (Renard, 1994). Les « parcelliseurs » et les promoteurs violaient les réglementations urbaines en vigueur, en particulier dans le cas des quartiers ouvriers lesquels étaient généralement livrés sans aucune infrastructure, avec un minimum d'accès routiers et dépourvus des services publics. Les transgressions affectaient aussi bien les nouveaux quartiers résidentiels périphériques que ceux s'intégrant dans l'agglomération consolidée. La configuration physique des lotissements périphériques ne répondait à aucune vision d'ensemble de la ville, leur dispersion renchérissait considérablement les coûts des infrastructures à la charge de la municipalité.

L'administration municipale de Bogota chercha à répondre de différentes manières : encadrer plus et mieux les « parcelliseurs » et les promoteurs immobiliers et par là l'expansion de la ville ; rééquilibrer puis organiser le processus de structuration urbaine ; adapter la ville aux exigences des nouveaux modes de transports et notamment de la voiture considérée comme le futur de la capitale. Les auteurs s'accordent sur le fait que les pouvoirs municipaux ne réussirent que dans le dernier objectif.

1) Expansion «administrative»

En 1951 la municipalité étendit son champ de compétence spatiale : la ville absorba plusieurs localités proches dans une «municipalité spéciale de Bogota». Cette intégration administrative visait à donner aux autorités de la ville les moyens institutionnels et financiers d'une planification de long terme (Dureau, Lulle, 1999).

Cette intégration des localités périphériques ne remit pas en cause la polarité socio-économique de l'agglomération : au Sud, Bosa et Usme s'intégraient au secteur populaire ; à l'Ouest, Fontibon et Engativa s'articulaient aux zones industrielles et aux zones résidentielles des classes moyennes ; au Nord, Usaquen et Suba devenaient des établissements de populations riches (Dureau, Lulle, 1999).

2) Planification urbaine : l'adaptation de Bogota à la voiture

Le plan « Futur de Bogota[56] » de 1922, qui ne fut jamais appliqué, est caractéristique des projets successifs de planification urbaine produits jusqu'à la fin des années 1970. Tout d'abord l'influence étrangère est prégnante, notamment les travaux de Haussmann à Paris, le modèle des cités jardins de Howard jusqu'au fonctionnalisme du Corbusier qui réalisa le plan pilote de 1951. Ensuite la nécessité d'adapter la ville aux exigences techniques et spatiales des transports routiers est perçue comme

[56] « Futuro de Bogota ».

cruciale pour le développement harmonieux de la ville. Ainsi, rapidement, le développement d'une trame viaire, hiérarchisée, reliant les différents sous-centres urbains, s'est imposé comme un élément central de la planification urbaine. Enfin l'objectif premier était de développer la circulation automobile. (Montezuma, 2000).

En 1933, le plan de Karl Brunner ouvrit plusieurs avenues dans le centre ville afin de construire une maille qui se superposerait à la trame coloniale orthogonale. L'avenue Caracas qui devint rapidement un axe central pour la ville, fut construite à cette époque. Le plan Soto-Bateman (1944) introduisit le concept d'aire d'utilité publique autorisant l'expropriation pour construire des routes. L'introduction du droit d'expropriation permit entre autre de construire la gigantesque avenue Las Americas (8 km de long, 150 m de large). Dans les années 1950 et 1960, suite aux dégâts provoqués par les émeutes de 1948, une série de grands travaux fut l'occasion de moderniser le centre ville, c'est-à-dire de l'adapter à la voiture (cf Photos 12 et 13). (Martinez, Duenas, 2003).

Dans les années 1950, l'administration municipale appuyée par l'état tenta de rééquilibrer les fronts d'expansion urbaine, en créant dans le secteur Ouest la Ville Universitaire, l'université Nacional de Colombia et l'aéroport El Dorado. Le plan pilote de Le Corbusier (1951) imposa l'idée, reprise dans le plan directeur de 1961, de hiérarchiser les voies et de décongestionner le centre en traçant des avenues périphériques, reliant le Sud au Nord en passant par les secteurs Ouest. Cela donna lieu à la construction de la carrera 30, la avenida 68, la Boyaca, la calle 100. Ces différents éléments seront les supports de l'urbanisation durant la période 1970 – 2000 des zones Ouest de Bogota, jusque là déconsidérées (Martinez, Duenas, 2003).

Photo 12 : Vue aérienne du quartier central de San Diego - 1960



Source: Bogotá CD

Photo 13 : Vue aérienne du centre de Bogota - 1960



Source: Bogotá CD

Ainsi **progressivement se met en place une trame viaire mixte et hiérarchisée, à la fois semi-concentrique, orthogonale et radiale**, résultat du réseau nouvellement construit en anneau et superposé à la trame orthogonale coloniale et linéaire du début du 20ème siècle. A la fin des années 1970, l'infrastructure viaire occupait 20% de la superficie urbaine (Martinez, Duenas, 2003).

Nous constatons alors que **la suprématie progressive du bus sur le tramway ne s'explique pas principalement par la différence technologique, mais surtout pas une convergence d'intérêts** que l'émergence d'un système de transport basé sur l'autobus a suscité : les compagnies de bus évidement ; les promoteurs immobiliers, légaux comme illégaux, dont la croissance de l'activité nécessitait le développement d'un système de transport en commun flexible ; les autorités municipales qui étaient dépassées dans leur charge de réglementation de l'usage des sols et préféraient reporter leurs efforts sur l'adaptation de la voierie -autant de libertés offertes à la spontanéité des marchés foncier et immobilier. En retour **cette phase d'atomisation et de polarisation** dans l'histoire du développement urbain de Bogota était dépendante de la progressive suprématie des transports routiers

- bus essentiellement mais aussi voiture – au détriment du tramway. Elle **a donc pu se produire parce que cette suprématie de la route fut orchestrée par les pouvoirs locaux et servait les stratégies des « parcelliseurs » et promoteurs immobiliers privés.**

Nous pouvons donc conclure de cette analyse de la période 1930 – 1970 que **les trois caractéristiques majeures de cette phase** de l'histoire urbaine de Bogota – l'étalement urbain, la macro-ségrégation sociale et le basculement d'une structure monocentrique à une structure polycentrique – **sont le résultat de la conjugaison de paramètres reliés entre eux** : le développement d'un système de bus, l'intensification de la promotion immobilière, l'urbanisation en discontinuité physique avec l'agglomération consolidée, l'érosion du centre ville et l'évolution des choix de localisation résidentielle des classes moyennes émergentes et des populations aisées, la planification urbaine délaissant la réglementation de l'usage des sols pour adapter la trame viaire aux nécessités du transport routier. **Toutes ces variables sont interdépendantes et co-déterminées.** Elles participent donc aux relations fonctionnelles du couple « transport – usage des sols » dont l'évolution détermine les modifications de la forme et de la structure urbaine.

Enfin notons que du fait de la forme linéaire de la ville, d'importantes superficies dans le secteur Ouest de Bogota se distinguaient par une faible intensité d'utilisation des sols et une proximité au centre ville relativement attractive pour les investisseurs. Ces quartiers furent en effet urbanisés durant la période suivante (1970 – 1990).

IV - 1970 – 2000 : dégradation de la mobilité et consolidation de la structure urbaine de Bogota

A - *Dégradation progressive de la mobilité*

Au cours du 20ème siècle, la ville de Bogota a graduellement adopté un modèle de transport dual concomitant avec une ségrégation socio-économique marquée : d'un coté, le système de transport des classes aisées, basé sur la voiture particulière, et de l'autre un système de transport en commun (autobus) mal organisé pour les populations pauvres. Un tel modèle peut fonctionner dans une ville de taille réduite, mais quand un certain seuil est dépassé, la conjugaison de ces deux composantes entraîne des problèmes aigus de congestion.

Durant la période 1970 – 2000, la mobilité à Bogota se dégrada progressivement. Six éléments caractérisent l'évolution du système de transport aboutissant à cette dégradation de la capacité des citadins à se déplacer dans Bogota : la congestion de la voirie, un service de bus détérioré, un taux de motorisation individuel croissant, une distribution spatiale déséquilibrée de la propriété des véhicules particuliers, une offre de stationnement insuffisante et une incapacité financière des autorités à développer un réseau routier conséquent.

Dans cette section nous décrivons les évolutions du système de transport et dressons le constat de la dégradation progressive de la mobilité. Nous discuterons dans la section V de ce chapitre les analyses développées à la fin du 20ème siècle sur les causes de ces difficultés et les réponses apportées par les autorités publiques.

1) La congestion et ses conséquences

La congestion du système de transport s'est accrue tout au long de la période 1970 – 2000 pour arriver dans les années 1990 à une situation dramatique. Les basses vitesses enregistrées sur les principaux corridors de la ville sont la preuve des importants problèmes de transport et se

traduisent par une augmentation des temps de déplacement, des niveaux de pollution élevés et des coûts d'opération des véhicules croissants.

Dans les années 1990, la vitesse moyenne est ainsi de 10 km/H, et descend durant les heures de pointes à 5 km/H sur les principaux axes de transit (tableau 25). Ces faibles vitesses ont des conséquences négatives sur les consommations énergétiques et les pollutions locale et globale.

Les temps de voyage moyen aux heures de pointe étaient de 2H30 par jour à la fin des années 1990 (Chaparro, 2002), ce qui s'explique en partie par les vitesses réduites mais aussi par la ségrégation socio-économique de la ville qui fait que les lieux de travail se situent très loin des lieux de résidences, notamment pour les classes pauvres qui sont les usagers majoritaires des transports collectifs. Ce temps de transport est deux fois plus important que la moyenne mondiale observée à la même époque par Zahavi (cf encadré 3).

Une conséquence de cette congestion croissante est la pollution locale et globale. La coopération japonaise JICA[57] travaillant sur le plan de transport estime en 1996 que 70% de la pollution atmosphérique locale provient des véhicules à moteur (Ministerio de Transporte, 2001). Ceci se traduit par une incidence élevée de maladies respiratoires – 1200 morts par an de pneumonie (Martinez, Medina, Santana, 2003).

Enfin l'insécurité routière est un point particulièrement critique. En 1998, il y eut 52 762 accidents et 1 174 morts sur les routes de Bogota (Ministerio de Transporte, 2001).

Tableau 25 : Flux de passagers sur les principaux corridors de Bogota en 1999

Corridor	Length Km	Passengers per day	Max. passengers per hour per direction	Commercial speed Km/Hr
Caracas Av. busway	16	372,658	36,500	18
Americas Avenue	9.8	332,454	32,647	12
80th Street	9.9	309,573	30,405	12
10th Avenue	3.5	295,998	29,066	<10
68th Street	12.9	191,008	18,757	<10
7th Avenue	3.2	108,523	10,657	10

Source : Rebelo, 2003

2) La répartition modale des déplacements en faveur des bus

Durant toute la période 1970 – 2000, l'évolution de la répartition modale des déplacements a suivi la tendance amorcée dans la période 1930 – 1970 étudiée précédemment : l'accès des populations les plus pauvres à un mode de transport n'a pas été amélioré et ces défavorisés ont continué à marcher à pied ; les compagnies d'autobus ont conforté leur suprématie auprès des classes pauvres et moyennes, les populations aisées ont progressivement mais massivement adopté les voitures particulières.

Le vélo reste un moyen de déplacement minoritaire à Bogota. Son utilisation quotidienne concerne surtout les populations pauvres.

Ainsi à la fin des années 1990, selon le Master Plan de Transport de Bogota (JICA, 1996), 14,9 millions de trajets sont réalisés chaque jour dans la ville, 22% se font à pied et 77% grâce à des moyens de transports motorisés. De ces déplacements motorisés, 75% sont effectués en transport collectif.

Le bus est donc le mode de transport quotidien principal à Bogota, aussi bien sur le total des déplacements – suivi de la marche à pieds- que sur le total des déplacements motorisés – suivi de l'automobile.

[57] Japanese International Cooperation Agencie

Tableau 26 : Distribution modale des déplacements en 1999

MODOS DE TRANSPORTE EN BOGOTA

Modo de viaje	Expansión corregida – Año 1999		
	Viajes/día	% sobre total	% sobre mecanizados
Pie	3.218.926	22,05	
Automóvil conductor	1.592.169	10,90	14,68
Automóvil acompañante	582.963	3,99	5,37
Taxi	590.736	4,05	5,45
Bus	7.295.656	49,97	67,26
Bus empresa	125.718	0,86	1,16
Bus escolar	660.457	4,52	6,09
Otros	534.237	3,66	
Total mecanizados	10.847.699		
Total	**14.600.862**	**100,00**	**100,00**

Source : Chapparo, 2002

3) La détérioration du service de transport collectif

L'atomisation de la propriété du parc d'autobus généra progressivement une sur-offre de bus en mauvais état, l'hétérogénéité et la stratification du service en fonction de la population desservie (Montezuma, 2000).

La taille du parc autobus augmenta graduellement durant toute cette période pour atteindre en 1996 un nombre supérieur à 21.000 véhicules de transports collectifs (JICA, 1996). Le parc était caractérisé par une grande hétérogénéité en termes de modèles de véhicules, de capacité et de tarif (JICA, 1996). L'étude JICA montre ainsi que les modèles variaient entre des séries sorties en 1960 et d'autres sorties à la fin des années 1990. L'âge moyen du parc à la fin du 20ème siècle était de 20 ans. Les bus correspondaient à une vingtaine de marques différentes. La capacité des bus variait entre les petits «colectivos» pour 9 personnes jusqu'aux grands bus pour 100 personnes.

Durant la période 1980 – 1996 **le parc autobus a connu une croissance bien supérieure au taux de croissance démographique** : le taux de croissance annuelle du parc autobus a été de 6% entre 1985 et 1993 alors que la croissance annuelle démographique a été de 3,3% sur la même période.

D'autre part alors qu'au début des années 1970 la capacité de la grande majorité des bus (77%) était de 60 places, en 1996 cette capacité ne représentait que 39% du parc au milieu des années 1990 (Ardila, 2004). La capacité moyenne a elle diminué de 63 sièges à 40 par véhicule. Ceci est le résultat de l'augmentation disproportionnée des véhicules de petite taille : le nombre de bus a été multiplié par 5 entre 1980 et 1996 alors que le nombre de place par 3 (JICA, 1996).

Le caractère hétérogène du parc autobus était le résultat de l'atomisation de la propriété, et d'une organisation institutionnelle inefficace que nous étudierons précisément lors de l'analyse de la sur-offre de transport collectif développée dans la section V de ce chapitre.

Ces transformations du parc ont eu diverses conséquences : **l'accroissement de l'espace consommé par passager transporté**, **l'augmentation du coût généralisé** (financier et temps de transport) **pour les usagers**, l'assujettissement de la qualité du service au prix payé et donc le **renforcement des inégalités spatiales et de la ségrégation socio-économique**.

La distribution spatiale et la prolifération des itinéraires illustraient bien l'inorganisation du réseau de transport collectif de cette époque. Les itinéraires suivis par les bus se concentraient sur quelques axes et formaient une desserte tentaculaire. De plus une écrasante majorité des itinéraires passaient par le centre, alors que des connexions plus efficaces pouvaient être effectuées entre les différents quartiers en utilisant les voies périphériques (contournant le centre ville) comme l'avenue Boyaca ou la carrera 68. Cette mauvaise utilisation de la trame viaire se traduisait par un

investissement important en temps pour les usagers et en ressources, notamment énergétiques, pour les transporteurs.

Depuis la disparition du tramway en 1952, une seule infrastructure a été construite pour améliorer les transports collectifs : la «troncal» de la avenue Caracas, un corridor deux fois deux voies de 15 km réservé au bus. Cette expérience fut un échec et le projet rapidement abandonné (encadré 13).

4) La motorisation des populations riches

Le taux de motorisation augmenta progressivement mais massivement durant la période 1970 – 2000, notamment dans la dernière décennie. La croissance des salaires et l'ouverture économique expliquent cette croissance du nombre de véhicules par habitants.

Du fait que la possession et l'utilisation de l'automobile ont été depuis son apparition à Bogota en 1905 jusqu'à la fin du 20ème siècle le privilège des classes aisées et influentes, et bien qu'il reste minoritaire dans la répartition modale des déplacements (environ 15% à la fin des années 1990), ce mode de transport a été continuellement encouragé par les administrations successives, au détriment des transports collectifs, de l'environnement et de l'espace public.

La politique d'ouverture économique initiée au début des années 1990 – réduction des taxes aux importations – a occasionné une augmentation considérable du parc automobile : entre 1990 et 1995 se sont vendus en Colombie autant de véhicules que durant la décennie antérieure, soit plus d'un demi million dont 25% pour Bogota et ses environs.

Les motos n'ont jamais joué un rôle important dans le système de transport de Bogota : 32.200 en 1995. L'insécurité, les basses températures et les conditions climatiques changeantes sur une journée sont les causes de leur faible développement comparé a d'autres grandes villes comme Cali ou Medellin. Au contraire de la voiture, le taux de motos par famille est a peu près équivalent dans les quartiers nord et sud, mais pour des usages bien différents : alors que au sud la moto constitue souvent le seul moyen de déplacement, au nord elle est avant tout un outil de recréation.

L'achat de véhicule neuf lié a l'ouverture économique a permis un léger rajeunissement du parc, mais surtout d'équiper une large tranche de la population, par la revente des véhicules anciens. A la fin des années 1990, un peu moins du tiers des ménages était motorisé (Chaparro, 2002).

5) Une distribution spatiale déséquilibrée de la propriété des véhicules

Du fait du développement urbain polarisé, la distribution spatiale de la propriété des véhicules était particulièrement déséquilibrée : **33% des véhicules étaient immatriculés dans les communes environnant Bogota** (JICA, 1996) ; **les propriétaires de voitures étaient concentrés dans la partie Nord de l'agglomération.**

Selon le Master Plan de Transport de Bogota de 1996 (JICA, 1996), 497.747 voitures circulaient dans la ville à cette époque. A cause d'une plus forte nécessité d'un véhicule particulier mais, d'après les experts, sans doute aussi du fait des taxes moins importantes à l'immatriculation, un tiers des véhicules de Bogota fut immatriculé dans les municipalités voisines de Bogota. Les municipalités présentent ainsi des taux de motorisation par personne supérieurs à Bogota (0,05) : Chia 0,55, la Calera 0,22, Soacha 0,25. En 1990, à Mosquera, le nombre de voitures était trois fois supérieur au nombre d'habitants – il y avait 3,47 voitures par habitant.

Etant donné la ségrégation socio-économique de la population, la distribution spatiale des véhicules était de même particulièrement déséquilibrée. La majorité des véhicules se concentre dans quelques un des quartiers Nord de la ville : sur les 19 municipalités de Bogota, 4 concentrent 52% des véhicules ; les deux municipalités les plus au Nord représentant 10% de la population et 12% de l'espace urbanisé concentraient 27% des véhicules de l'agglomération. Ce déséquilibre perdure encore aujourd'hui.

Cette inégale distribution entraîne une concentration des véhicules particuliers sur certains axes routiers et certaines paires de déplacement Origine – Destination, ce qui contribue d'autant à la congestion de ces axes et à la dégradation de la mobilité urbaine.

6) Les difficultés de stationnement

L'augmentation progressive du nombre d'automobiles a exercé une demande croissante d'espace pour stationner. Petit à petit l'espace public fut alors utilisé de manière de plus en plus désordonnée et non contrôlée, notamment dans les quartiers où la densité de voitures était importante, comme dans le centre de la ville, les aires commerciales et universitaires. La période 1970 – 2000 est caractérisée par une **invasion des trottoirs par les voitures**, réduisant d'autant l'espace réservé pour les piétons. Une étude réalisée à la fin des années 1990 (PROYEKTA LTDA, 1996) sur le stationnement le long de la carrera 15 a ainsi montré que si on met de côté les 760 places de parking des édifices – satisfaisant 11% de la demande totale de stationnement – 92,7% du stationnement se réalisait sur les trottoirs et 7,3% sur les zones de parking payant.

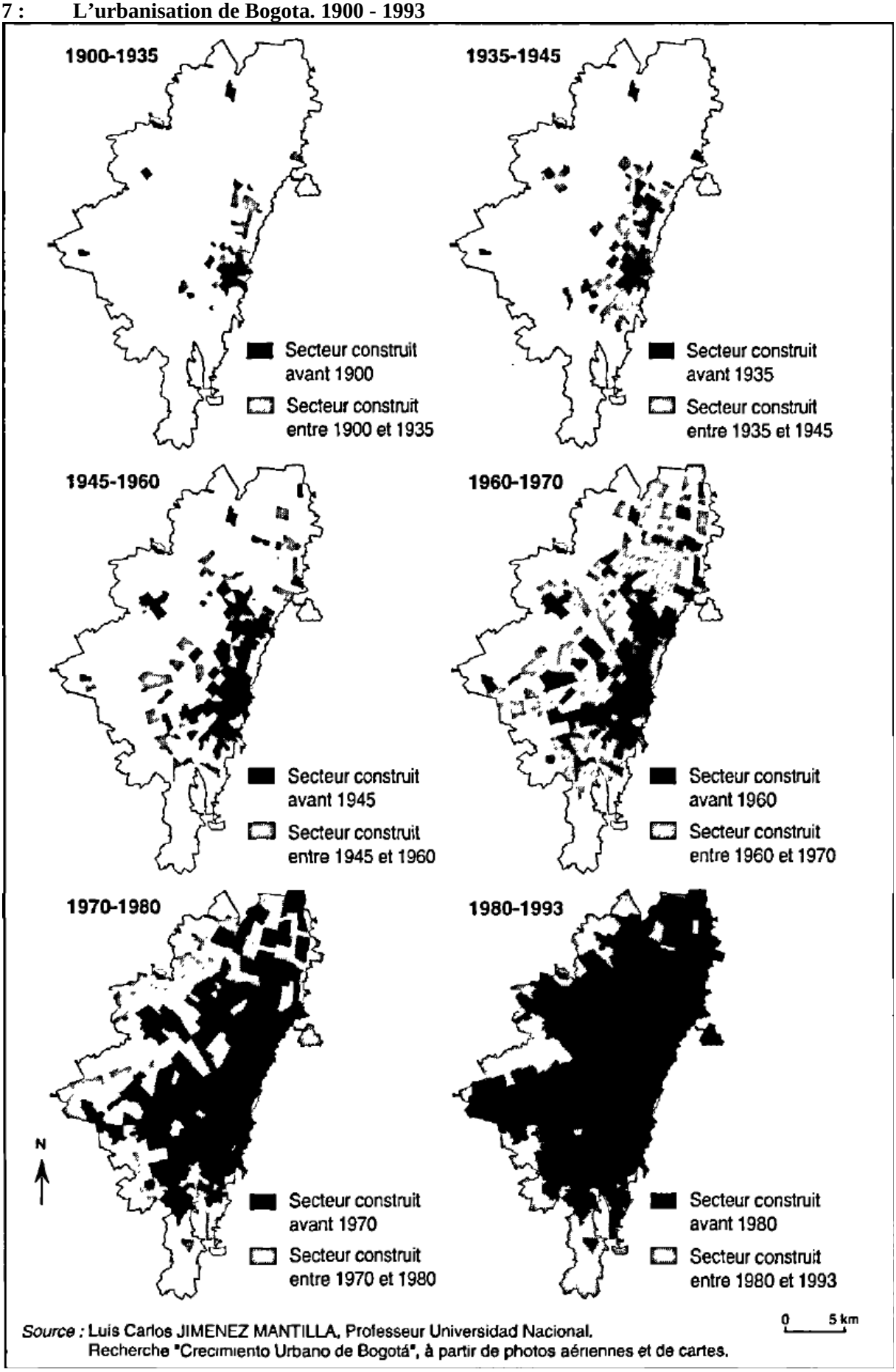
7) Une volonté politique de développer la trame viaire

Durant les années 1970 et 1980, le réseau de route a largement été développé. L'armature de base de la trame viaire que l'on connaît aujourd'hui fut construite durant cette période : quatre voies circulaires (périphériques intérieurs), une quinzaine de voies radiales, prés de vingt voies transversales et enfin une quarantaine de passages à niveau – 90% élevés et 10% souterrains.

Durant toute cette période, la qualité d'un maire se jugeait au nombre de ponts construits et de trous bouchés dans le macadam des routes durant son mandat. Le développement d'infrastructures routières, conçues par des ingénieurs selon une approche «trafic» (encadré 1) des problèmes de transport et de congestion, non seulement constituait une alternative de court terme au problème de circulation mais en plus défigurait la ville et dégradait la mobilité non-motorisée. Les viaducs et ponts produisent des coupures urbaines qui obligent les véhicules mais surtout les piétons et les vélos à des détours importants.

Ainsi les autorités locales démontrèrent une réelle **volonté de construire un réseau routier répondant à la circulation croissante** à Bogota. Ce point était devenu un enjeu électoral local. Malheureusement, les pouvoirs successifs durant la période 1970 – 1990 adoptèrent une approche « trafic », ce qui constitua une **fuite en avant inapte à résoudre les problèmes de congestion**. Et cela d'autant plus que les **capacités financières limitées des autorités locales ne permirent pas un développement du réseau routier proportionnel à la croissance du nombre de véhicules** circulant dans Bogota. Ces mêmes difficultés financières obligeaient les pouvoirs locaux et nationaux à reporter la construction d'un système de transport en commun massif.

Carte 7 : L'urbanisation de Bogota. 1900 - 1993



Source : Luis Carlos JIMENEZ MANTILLA, Professeur Universidad Nacional.
Recherche "Crecimiento Urbano de Bogotá", à partir de photos aériennes et de cartes.

B - *Une nouvelle dynamique urbaine : la consolidation et la recomposition interne de la forme et de la structure urbaine héritée*

Au cours de la période 1970 – 2000 Bogota rompit avec la tendance à l'expansion qu'elle connaissait depuis le début du siècle, et se transforma en une agglomération plus compacte et semi-circulaire (Montezuma, 1999). **Bogota passa ainsi d'un développement urbain caractérisé par l'atomisation, l'expansion rapide et la dé-densification à un modèle urbain de métropole en voie de consolidation, de recomposition interne et de re-densification** qui intégrait de manière plus fonctionnelle que physique les municipalités périphériques (Dureau, Lulle, 1999). **Le polycentrisme hérité de la phase précédente est accentué**.

Nous reprenons le terme de « consolidation » employé[58] par Dureau (Dureau, 2000) pour désigner la mise en place à Bogota dans la période 1970 – 2000 d'un « nouveau modèle de développement » urbain « centripète : l'espace déjà urbanisé connaît des transformations et des processus de redensifications rapides, qui contribuent, avec une occupation plus générale de l'espace à l'intérieur du périmètre urbain, à une augmentation de la densité moyenne (moins de 100 hab/ha en 1973, 130 hab/ha en 1985 et 150 hab/ha en 1993) » (Dureau, 2000). Dureau considère que « l'expansion des décennies antérieures […] cède la place dans les années 1970 à une occupation plus générale de l'espace à l'intérieur du périmètre urbain et le démarrage de la construction en hauteur ». (Dureau, 2000)

1) Les facteurs explicatifs de la consolidation

La croissance démographique de Bogota durant la période 1970 – 2000 resta forte : 3,35% par an entre 1973 et 1985, 3,31% par an entre 1985 et 1993. Si on ajoute au district de Bogota les municipalités périphériques, ces taux annuels étaient de 3,46% et 3,64%.La population du district de Bogota passa ainsi de 2.861.000 habitants en 1973 à 4.236.000 habitants en 1985 et 5.484.000 en 1993.

Aussi, avec cette persistance d'un rythme d'accroissement démographique élevé, nous aurions pu nous attendre pour la période 1970 – 2000 à une continuité dans les dynamiques urbaines avec celles observées au cours de la période 1930 – 1970, à savoir une urbanisation atomisée et une expansion urbaine. Pourtant la conjugaison d'une série de facteurs inversa ces tendances et les dynamiques d'urbanisation de la fin du 20ème siècle eurent pour conséquences de consolider la forme et la structure urbaine héritée.

Le premier de ces facteurs était bien entendu la **forte dégradation des conditions de transport urbain** qui affectait le fonctionnement socio-économico-spatial de la ville.

Le deuxième facteur résultait de la construction à partir des années 1950 d'une **série d'anneaux routiers périphériques** pour éviter que le transit Nord-Sud passe par le centre ville. De cette manière, les zones auparavant non occupées de l'Ouest devinrent attractives pour de nouvelles urbanisations, compliquant la polarisation Nord-Sud sans toute fois l'annuler.

Le troisième facteur permettant d'expliquer les changements dans les dynamiques d'expansion et de structuration de la ville fut la **libéralisation des procédures de planification et de contrôle des usages des sols**. Jusqu'en 1970 environ, la municipalité essayait d'imposer au moins des orientations stratégiques ; à partir de cette date, elle renonça à cette ambition et les règlements d'usage des sols se relâchèrent graduellement, les planificateurs partaient de l'idée que **le marché est un bon régulateur des dynamiques urbaines**. Arango (Arango, 2001) estime que la gestion de Bogota passe à une « période de marché ». Dureau (Dureau, 2000) souligne que dans les années 1970 « est introduit le concept de planification économique du développement urbain et [l'autorité municipale] s'interesse moins au cadrage spatiale ». Les niveaux de densité maximum et les usages autorisés furent moins réglementés, ce qui libéra les dynamiques spontanées du marché. A cette évolution conceptuelle vers une planification urbaine régulée par le marché, il faut ajouter un **manque de moyens financiers et**

[58] Dureau (Dureau, 2000) parle de « consolidation de la structuration fonctionnelle ».

juridiques à la disposition des autorités locales. La décennie 1980 est marquée par une profonde crise économique qui conduisit la Colombie à un endettement sans précédent. Cette crise entraîna des restrictions budgétaires drastiques dans le personnel des institutions publiques et leurs programmes. La gestion urbaine fut particulièrement affectée d'une part parce que les administrations perdirent beaucoup de personnel qualifié et d'autre part car le manque de moyens obligea les interventions publiques à se réorienter vers des programmes sectoriels limités et à abandonner tout planification d'ensemble (Riveros, 2004). De plus il faut attendre 1989 et la loi n°9 concrétisée dans l'*Acuerdo 6* pour que les autorités en charge de la gestion urbaine disposent des outils juridiques (normes urbaines, normes de construction, droit de préemption, expropriation, banques foncières publiques, pouvoirs décentralisés aux municipalités, participation démocratique, récupération de la valorisation foncière, etc.) nécessaires à la gestion intégrale de l'usage des sols (Robles, 2006). Et encore les outils introduits par cette loi n°9 ne furent consolidés par une légitimation juridique claire et hiérarchisée que en 1997 avec la loi n°388 (Riveros, 2004). Ces restrictions financières et juridiques firent que les normes et les plans urbains successivement décidés au cours de la période 1970 – 2000 ne purent pas être mis en œuvre (Renard, 1994). Ainsi, par exemple l'*Acuerdo 7* de 1979 fixant la zone urbaine, bornée par le développement des services publics et définissant le droit des sols et les processus d'aménagement resta lettre morte. Dureau (Dureau, 2000) considère ainsi que « l'urbanisme a plus accompagné l'urbanisation qu'il ne l'a précédée, orientée et contrôlée » durant la période 1970 – 2000.

Enfin le quatrième facteur concernait les **importantes mutations que connut le secteur de la production foncière et immobilière urbaine** à partir des années 1970. Dès son élection en 1970, le président Pastrana (1970 – 1974) lança le plan national de développement[59] pour la Colombie dans lequel le secteur de la construction (et notamment la construction de résidences) devait devenir un « secteur leader » de l'économie nationale. Ce plan s'accompagna d'**un ensemble de mesures en faveur du développement du secteur de la promotion immobilière** (Silva, Sandilands, 2003). L'objectif de ce plan était notamment d'accélérer l'urbanisation et l'industrialisation de la Colombie (Silva, Sandilands, 2003). Tout d'abord un **système nouveau de crédit hypothécaire UPAC**[60] visant à faciliter l'accès à la propriété immobilière fut créé en 1972. L'UPAC consistait en un système d'épargne et de crédit sur le long terme garantissant le maintien de la valeur de l'argent épargné grâce à des réajustement successifs en fonction de l'inflation plus un petit taux d'intérêt (Arango, 2001). Ce nouveau système de financement appuyait aussi bien la construction de nouvelles résidences que leur acquisition avec des crédits à long terme, cette fois accessibles à une grande majorité de la population, notamment à l'ensemble de la classe moyenne. L'UPAC offrit au secteur de la construction les ressources financières pour se développer et créa un marché de l'immobilier dynamique, notamment entre les classes aisées, moyennes et moyennes-inférieures. La réforme de la branche financière du secteur immobilier entraîna de profonds changements. **La promotion immobilière progressa** de façon accélérée, dans l'absolu mais aussi relativement aux dépens de la construction sur commande. En 1973, les promoteurs immobiliers produisaient 15% des logements légaux, en 1985 73%. De son coté la construction sur commande passait de 34% a 6% (Cuervo, Jaramillo, 1987). Par ailleurs on observa **une concentration accélérée des entreprises de ce secteur** (Cuervo, Jaramillo, 1987) et pour la première fois, les promoteurs immobiliers répondirent à la sphère supérieure de la demande de logement. En outre, au cours de ces décennies l'auto construction spontanée se maintint et les grands promoteurs illégaux se fortifièrent grâce à un mouvement de concentration aussi rapide que celui des promoteurs légaux (Cuervo, Jaramillo, 1987).

[59] Plan Nacional de Desarollo « Las cuatro estrategias », Departamento Nacional de Planeacion, 1971.

[60] « Unidad de Poder Adquisitivo Constante », « Unité de Pouvoir d'Achat Constant » traduction de l'auteur.

2) La consolidation de la forme et de la structure urbaine héritée.

a) Localisation résidentielle des populations moyennes et riches : « tendance aux retours », micro-ségrégation et densification

Un premier effet de cette conjugaison de facteurs fut l'**évolution des stratégies résidentielles des groupes les plus aisés, aussi bien sur le type de logement que sur la localisation de ces logements**. Durant les périodes précédentes, les familles riches ne faisaient pas appel aux logements standardisés produits par les promoteurs immobiliers mais recouraient à des architectes particuliers pour construire des maisons sur commande. Au cours de cette quatrième période, les promoteurs immobiliers lancèrent une offensive commerciale en vue de modifier ce comportement, avec un discours mettant l'accent sur l'insécurité de la ville. Ils proposèrent de nouveaux produits générant une micro-ségrégation (Dureau, 2000) que les mécanismes de marché foncier et immobilier ne pouvaient pas produire seuls : des lotissements fermés et protégés[61], de maisons et surtout d'appartements de luxe. Cette stratégie fut complétée par la multiplication des lieux de socialisation d'accès restreints - centres commerciaux, hypermarchés, clubs sportifs, etc. - que la récente constitution de puissantes capacités financières grâce à la concentration du secteur de la construction rendait possible.

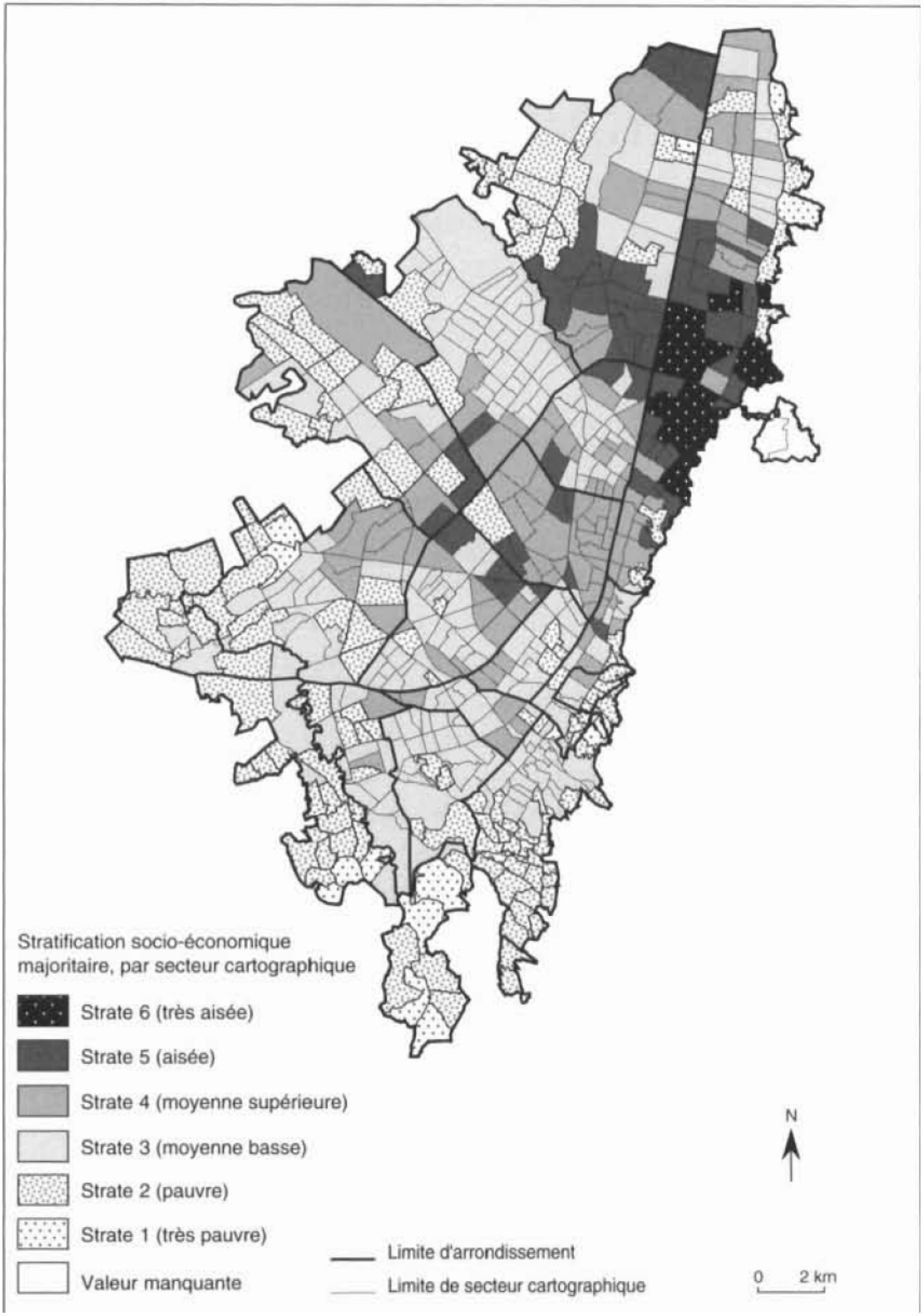
Cette offre nouvelle de résidences sécurisées et de haut standing et les difficultés croissantes de transport produisirent un changement dans les dynamiques de périphérisation continue des populations aisées. Cuervo et Jaramillo puis Dureau (Cuervo, Jaramillo, 1987 ; Dureau, 2000) observent une « tendance au retour », sinon vers le centre de la ville, du moins vers d'anciennes localités – comme Chapinero alto, Rosales, Cabrera – que les familles riches avaient abandonnées quelques décennies avant. Ce retour à la ville donna lieu à un processus de rénovation et de densification de ces quartiers où les maisons unifamiliales jadis produites sur commande furent démolies et remplacées massivement par des immeubles en hauteur. Si tous les auteurs (Dureau, Lulle, 1999 ; Montezuma, 2000 ; Ardila, 2004) s'accordent sur cette « tendance au retour », il est regrettable de ne pas disposer d'études quantitatives.

Une évolution similaire toucha les classes moyennes. En raison des facteurs cités précédemment, de la rareté de terrains dans les « beaux quartiers » et des difficultés économiques conjoncturelles des classes moyennes, les promoteurs leurs proposèrent des projets de lotissements fermés et protégés mais cette fois dans les zones de la ville jusque là quasi-exclusivement occupées par des populations pauvres : le Sud et l'Ouest (Dureau, 2000). Le processus était rendu possible d'une part par la taille de ces opérations qui atteignait la masse critique pour une réécriture sociale de portions importantes du territoire urbain et d'autre part par les modalités de micro-ségrégation (lotissements fermés et protégés) (Cuervo, Jaramillo, 1987).

Ainsi **le schéma de macro-ségrégation très accentuée dans le passé commençait à se lézarder** (Dureau, 2000). Les nouvelles stratégies résidentielles des classes moyennes et riches donnent lieu à une recomposition interne de la structure urbaine, complexifiant la bipolarité socio-économique historique. Un résultat global fut la tendance à la densification accrue : la densité de population passe d'un niveau inférieur à 100 hab/ha en 1973 à 130 hab/ha en 1985 et 150 hab/ha en 1993.

[61] « conjuntos cerrados »

Carte 8 : Distribution spatiale des différentes classes socio-économiques. 1990



Source : Dureau, 2000

b) Renforcement du polycentrisme

i) Dégradation sociale et physique du centre ville

Un deuxième effet de la conjugaison de facteurs décrite précédemment est l'accélération du processus de **dégradation sociale et physique du centre traditionnel, la perte de son rôle au sein de l'agglomération, son remplacement par de nouveaux sous-centres**.

Cette évolution dans les centralités urbaines s'explique aussi par l'insécurité et la congestion qui régnaient au centre ville durant la période 1970 - 2000. La littérature (Montezuma, 2000) met souvent en exergue que la perte d'habitants due à la concurrence d'autres usages entraîna un affaiblissement du contrôle social exercé par les résidents. De même certains auteurs (Montezuma, 2000) mettent en avant le débordement du «centre populaire», situé dans le passé à côté du «centre traditionnel», dû a la prolifération d'activités informelles n'obéissant pas au marché du sol – les marchands ambulants – et à la concentration d'activités commerciales et de services visant les populations pauvres – l'affluence de clients étant importante, le taux de roulement rapide des capitaux permettait d'atteindre des rentes plus élevées que celles des activités visant les populations riches. Cette époque est de plus marquée par **la progressive migration des activités tertiaires supérieures vers le Nord** : les activités financières et de gestion se concentrèrent progressivement entre la rue 72 et la rue 100. **Le centre traditionnel se spécialisa sur des activités populaires.**

L'essor des sous-centres du Nord formait un continuum très étendu d'activités centrales sur un axe d'environ 10 km partant du centre historique. Toutefois, la fusion physique n'impliquait pas un fonctionnement comme une seule entité : les différences entres les composants étaient bien marquées en terme de type d'activités tertiaires proposées et de caractéristiques sociales des usagers.

ii) Augmentation du poids des pôles périphériques

Si la ville centrale se consolidait et se densifiait**, certaines communes périphériques connurent durant la période 1970 – 2000 un peuplement important**. Dureau (Dureau, 2000) décrit ainsi une « double dynamique d'expansion spatiale et de densification d'espaces urbanisés ». Si la seconde est plus massive, la première doit être mentionnée car elle marque selon Dureau le point de départ d'un processus de « métropolisation » de Bogota (Dureau, 2000). Ainsi un ensemble de 15 communes autour de Bogota présentait des dynamiques (relatives) de peuplement nettement plus fortes que Bogota. Entre 1973 et 1985, le taux d'accroissement de ces communes était de 4,56% contre 3,35% pour Bogota ; entre 1985 et 1993, il était de 6,49% contre 3,31% pour la capitale (Dureau, Lulle, 1999). Si on envisage l'agglomération de Bogota et ses communes périphériques comme une unité spatiale, le poids des communes périphériques passa de 8,5% de la population totale en 1973 a 12% en 1993. La part des accroissements présentait également des chiffres significatifs : entre 1964 et 1973, ces communes représentaient 5,7% de l'accroissement de population de l'ensemble, entre 1985 et 1993, il atteint 19%. (Dureau, Lulle, 1999)

Ce peuplement des pôles périphériques se réalisait selon deux modalités. **Au sud, il s'agissait d'une conurbation**, urbanisation continue du périmètre urbain débordant sur la commune voisine de Soacha et l'absorbant dans un continuum urbain. **Au Nord et à l'Ouest le peuplement se présentait de façon discontinue**, dans l'accroissement des noyaux urbains environnant Bogota. Ces différentes modalités sont évidemment à relier avec la possession ou non d'une voiture par les populations nouvellement installées dans ces communes périphériques.

3) Une dynamique de recomposition[62] interne de l'espace urbain hérité

Durant la période 1970 – 2000, **le modèle d'organisation spatial hérité de la période précédente s'est consolidé tout en connaissant une recomposition interne**. Pour mieux comprendre cela il s'agit d'analyser trois éléments caractéristiques de l'organisation urbaine héritée du processus historique d'urbanisation de Bogota : les cercles concentriques, les bandes d'activités et la macro-

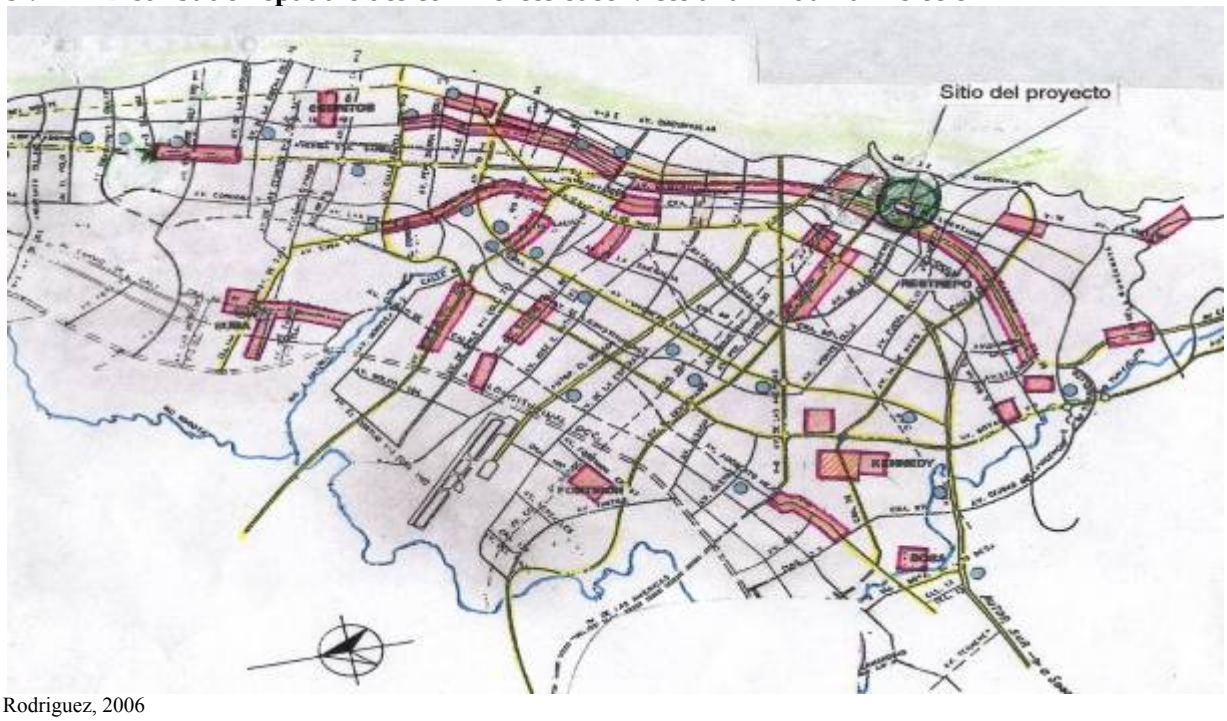
[62] Nous empruntons le terme de « recomposition interne » à Dureau (Dureau, 2000).

ségrégation socio-économique. Ces trois éléments caractéristiques de l'organisation urbaine héritée ont connu d'importantes évolutions durant les trois dernières décennies du 20ème siècle.

Les cercles concentriques autour de la place Bolivar étaient l'une des traces les plus fidèles de l'évolution de la ville : les demi-cercles centraux étaient les plus anciens, les plus denses, là où la taille des familles était la plus réduite. Vers la périphérie, les cercles, moins denses, accueillaient des constructions moins anciennes et des familles plus nombreuses. Durant la période 1970 – 2000, **cette organisation spatiale en cercles concentriques tend à disparaître** pour ce qui est de l'âge du parc immobilier et de la densité. Le processus de « retour à la ville » décrit précédemment implique l'apparition de vastes zones avec un parc immobilier neuf, situé notamment dans le péricentre de la ville et sur l'axe centre – Nord. De plus des centres populaires situés à la périphérie Sud de la ville se densifièrent intensément et prirent la relève du centre ville en terme de capacité de logement des familles à faibles revenus dans des maisons partagées.

Les bandes d'activités étaient le résultat de la migration des activités depuis le centre ville et de l'émergence de polarités nouvelles durant la phase précédente. A la fin des années 1960, nous pouvions observer trois bandes principales : vers le Nord, les différents sous-centres commerciaux tendant à fusionner physiquement et à former un couloir plus ou moins continu de haute densité d'activités commerciales et tertiaires supérieures ; vers le Sud-Ouest, la prolongation de Puente Aranda prenait la forme d'un couloir industriel, accompagné de sous-centres satellites (non intégrés physiquement) comme Cazuca, Soacha-Sibate et Morato ; vers l'Ouest s'affirmait un autre axe tertiaire spécialisé dans les fonctions politico-administratives et de loisir, regroupant des sous-centres comme le Centre Administratif Districtal (CAD), le Centre Administratif National (CAN) et le campus de l'université Nationale, les parcs métropolitains et une vaste infrastructure de loisir autour du parc Simon Bolivar. A la fin du 20ème siècle, l'extension de l'activité économique sur l'ensemble de la ville et le mélange des usages étaient si accentués que **le modèle antérieur de bandes bien marquées, clairement spécialisées dans des fonctions déterminées, tendait à s'estomper**. Les nouvelles dynamiques semblaient plus être caractérisées par l'apparition de nouveaux centres, le développement de nouveaux couloirs et le mélange des fonctions économiques dans les espaces centraux. Au niveau commercial, la ville continuait à s'étendre vers le Nord ; l'autoroute du Nord s'affirmait comme le principal axe d'expansion commerciale pour les populations moyennes et riches et le centre commercial Centro Chia comme la bordure extrême de cet axe. Le changement le plus notable est l'apparition d'une nouvelle polarité éloignée du couloir traditionnel centre-Nord, dans le secteur de Ciudad Salitre, à l'Ouest de la ville, à proximité de l'aéroport international El Dorado. Au niveau industriel, nous observons l'apparition de deux nouveaux couloirs, l'un vers le Sud, le long de la avenue Caracas, l'autre vers l'Ouest, le long de la Calle 80, et d'une nouvelle polarité au croisement de l'autoroute Nord et de la rue 170.

Carte 9 : Distribution spatiale des commerces et services à la fin du 20ème siècle



Source : Rodriguez, 2006

Une macro-ségrégation urbaine avec les quartiers résidentiels des classes aisées au Nord et les quartiers pauvres au Sud s'était progressivement mise en place, notamment pendant la phase 1930 – 1970. Cette bipolarité était accentuée par la forme linéaire de la ville. Au cours des trois dernières décennies du 20ème siècle, le renforcement des promoteurs immobiliers contribua à la **recomposition interne de la ville et à la désintégration de la polarisation sociale Nord – Sud**. Les grandes opérations de lotissements fermés et sécurisés pour les classes moyennes furent notamment enclavées au milieu de vastes quartiers traditionnellement populaires, généralement d'autoconstruction. Les groupes sociaux se rapprochèrent physiquement, même si les modes de vie et l'appropriation de l'espace continuèrent à se différencier. Plutôt que la disparition de la ségrégation socio-économique dans la ville, ce changement suggère l'émergence de nouvelles formes et modalités de cette ségrégation (Montezuma, 2000).

Enfin la ville a amplement dépassé ses frontières juridiques et a étendu son aire d'influence vers les communes environnantes, prolongeant en partie la structure interne de la ville : au Nord on trouvait principalement les faubourgs résidentiels des classes aisées, à l'Ouest et au Sud-Ouest les quartiers populaires, les faubourgs industriels et des localités à haute concentration de cultures de fleurs pour l'exportation. Ces localités métropolitaines, très spécialisées au départ dans les fonctions résidentielles, commerciales, industrielles ou agro-industrielles, diversifièrent progressivement leurs activités économiques et tendent à s'affirmer à la fin du 20ème siècle comme de nouvelles polarités urbaines.

Ainsi **Bogota connaît durant les trois dernières décennies du 20ème siècle une profonde évolution de son processus de structuration urbaine**.

Progressivement, **le système de transport se sature et la mobilité se dégrade**. La congestion de la voirie est forte et engendre des sur-coûts économiques, sociaux et environnementaux. Le service de bus servant à une majorité des déplacements se détériore. Le taux de motorisation de la population citadine s'accroît fortement. La propriété des voitures est polarisée au Nord de la ville. Le stationnement des véhicules particuliers devient problématique. Le développement de la voirie, faute de ressources financières suffisantes, n'est pas assez rapide pour satisfaire l'accroissement du trafic.

A cette dégradation des conditions de la mobilité s'ajoute un ensemble de facteurs liés aux **évolutions de la planification urbaine et du secteur de la production foncière et immobilière** pour expliquer une **nouvelle dynamique urbaine**. Alors que l'atomisation, l'expansion rapide et la dé-densification caractérisaient les dynamiques de développement urbain de la période 1930 – 1970, Bogota devient à la fin du 20ème siècle une métropole en voie de consolidation, de recomposition interne et de re-densification. Ainsi Bogota rompt avec la tendance à l'expansion qu'elle connaît depuis le début du siècle, et se transforme en une agglomération plus compacte et semi-circulaire. Le polycentrisme né durant la phase précédente est accentué.

L'analyse de cette phase de l'histoire urbaine de Bogota nous conforte dans notre hypothèse de l'existence d'un couple « transport – usage des sols » déterminant les évolutions de la structure urbaine. Les paramètres participant aux relations fonctionnelles du couple – l'offre de transport, la planification municipale, la promotion immobilière, etc. – sont bien interdépendants et co-déterminés. Et **le bouleversement de certaines de ces variables peut inverser les dynamiques traditionnelles de structuration de l'espace urbain**.

C - *Les marchés foncier et immobiliers, reflets et causes des dynamiques de structuration urbaine*

Profitant de l'existence de séries temporelles des prix fonciers sur cette période 1970 – 2000, nous analysons dans cette sous-section les liens entre les marchés immobiliers et foncier d'une part et d'autre part les relations entre ces marchés et les dynamiques de structuration urbaine.

1) Distribution spatiale des prix fonciers à la fin du 20ème siècle

Croisant le découpage[63] de l'agglomération en 108 zones proposé par JICA (JICA, 1996) et les données de prix fonciers de la Lonja de Propriedad Raiz de Bogota (LPRB) complétées par Garza et Montana avec une méthode économétrique pour les 31 zones non répertoriées par la LPRB, Garza et Montana (Garza, Montana, 2000) analysent la distribution spatiale des prix fonciers à Bogota en 1995.

a) Distribution monocentrique des prix fonciers

Garza et Montana (Garza, Montana, 2000) observent **une distribution globalement monocentrique des prix fonciers rompue par plusieurs centralités secondaires.**

Les prix fonciers les plus élevés se rencontrent au Nord du centre ville traditionnel, dans les localités de Chapinero et Usaquen (cf. Annexe 5 cartes des municipalités du District de Bogota) - plus précisément dans la zone comprise entre l'Autoroute Nord, la Calle 140, les montagnes orientales et la Calle 63.

Ce secteur à forte valeur foncière est entouré de quartiers où les prix fonciers ont des valeurs moyennes. La différence entre la zone de valeurs foncières les plus élevées et ce premier anneau de valeurs foncières moyennes est plus importante à l'Ouest, notamment au Nord-Ouest de la Calle 100 et de l'avenue 68, que au Nord et au Sud.

Les zones présentant les plus faibles valeurs foncières sont situées dans les périphéries, et notamment dans les périphéries Sud de la ville qui sont les zones les plus éloignées géographiquement de Chapinero et Usaquen et qui concentrent les populations les plus pauvres.

Cette distribution spatiale en anneaux concentriques où les prix fonciers décroissent depuis le centre localisé sur Chapinero et Usaquen semble contredire le polycentrisme mis en exergue dans la section précédente. Toutefois Garza et Montana observent que ce schéma concentrique est rompu par plusieurs centralités secondaires : la zone 47 (Ciudad Salitre), le groupe des zones 88, 89, 90, 91

[63] L'annexe 3 présente (cartes et tableau des zones) le zonage de l'agglomération de Bogota effectué par JICA (JICA, 1996).

(Restrepo, Ciudad Jardin Sur), les zones 85 et 86 (Plaza Espana, El Cartucho) et la zone 34 (Fatima-Venecia). Ce qui tend à **confirmer le caractère polycentrique de la structure urbaine de Bogota**.

b) Relation entre les prix fonciers et les usages des sols

Garza et Montana (Garza, Montana, 2000) observent que **les prix fonciers les plus élevés se rencontrent dans les zones où prédomine l'usage commercial des sols, et dans les quartiers résidentiels concentrant les populations aisées** (les zones 7, 8, 9, 10, 11 et 12).

Les valeurs moyennes du sol coïncident avec

- **les quartiers résidentiels de la classe moyenne** : les zones 71 (La Castellana), 74 (Metropolis), 89 (Luna Park), 47 (Ciudad Salitre), 6 et 5 (Cedritos)
- **le centre historique étendu** : les zones 12, 13, 14, 15 (Chapinero, Palermo et La Magdalena), 78 et 77 (Teusaquillo et Galerias), 16 et 19 (Centro Internacional), 83 et 84 (Los Martires)
- **les quartiers de commerce populaire** : les zones 73 (Siete de Agosto), 91 (Restrepo), 75 et 55 (Las ferias et La Estrada)

Les valeurs foncières les plus basses correspondent aux zones où prédominent les usages industriels, les quartiers résidentiels des populations pauvres, et les périphéries.

c) Relation entre les prix fonciers et les densités brutes

Garza et Montana (Garza, Montana, 2000) constatent **que les densités brutes[64] les plus élevées coïncident avec les zones de valeurs moyennes du sol** - et non dans les zones où les prix fonciers sont les plus élevés : le long de l'avenue Caracas depuis la Calle Primera Sur jusqu'à la mairie de Tunjuelito (zones 88, 89, 91, 102, 103, 104 et 105), la zone résidentielle de Puente Aranda (97, 96, 100 et 101) et de Ciudad Roma (46), le Nord Ouest (74, 54, 55, 57, 58 et 60) et les quartiers les mieux lotis du Sud-Est (24 et 25). Ces zones de forte densité se voient souvent séparées par des zones de densité moyenne et basse. **Les densités intermédiaires se rencontrent dans les quartiers les plus pauvres.**

Les densités les plus basses se rencontrent dans les zones industrielles et les périphéries de faible valeur foncière, ce qui semble confirmer la théorie néo-classique selon laquelle le prix foncier influence l'intensité de l'usage du sol.

Par contre **les zones présentant les valeurs foncières les plus élevées sont les quartiers résidentiels des populations aisées et elles coïncident avec des densités brutes basses**. D'un point de vue théorique, cette observation de Garza et Montana peut s'expliquer par deux hypothèses : l'usage plus intensif des sols se traduit cette fois par une élévation des constructions (immeubles de plusieurs étages), ce qui ne correspond pas nécessairement avec une forte densité brute (cf encadré 2) ; un revenu plus élevé des populations aisées leur permet d'acheter plus d'espace construit, ce qui se traduit par des valeurs foncières élevées coïncidant avec des densités faibles. Cette seconde hypothèse semble être confirmée par les observations de Dureau, Lulle et Parias (Dureau, Lulle, Parias, 1997) d'une superficie des appartements produits par les promoteurs immobiliers formels augmentant avec le revenu du ménage : 81,4 m2 pour les classes aisées, 68,9 m2 pour les classes moyennes et 59,9 m2 pour les classes pauvres.

Garza et Montana estiment alors que la structure urbaine de Bogota dépend des décisions de localisation des élites. Les populations aisées occupent des aires urbaines de moindre densité ; les classes moyennes se concentrent dans des zones de fortes densités, près des secteurs commerciaux ; et les groupes les plus pauvres occupent des zones de densité intermédiaire.

[64] Cf encadré 2

d) Relation entre les prix fonciers et la desserte routière

Garza et Montana (Garza, Montana, 2000) observent que **les zones où les valeurs foncières sont les plus élevées correspondent au secteur le mieux desservi par le réseau routier**. Chapinero et Usaquen se situent en effet au croisement de cinq voies principales : l'autoroute Nord –avenue Caracas, l'avenue Ciudad de Quito, l'avenue 68, l'avenue Boyaca. Au contraire les zones périphériques, et notamment celles au Sud, où les valeurs foncières sont relativement basses, sont mal desservies par la trame viaire. Seule la zone 30 située à Usme, à l'extrême Sud de la ville, est desservie par deux vois principales : l'avenue Caracas et l'avenue Boyaca.

e) Conclusions

Nous pouvons alors penser que **cette graduation dans les prix fonciers à la fin du 20ème siècle est le reflet à la fois du décalage temporel de l'urbanisation de ces zones -** le Nord et le Sud ont été urbanisé bien avant l'Ouest, les zones centrales avant les périphéries – **mais aussi de la polarisation sociale et fonctionnelle progressivement mise en place** – le Nord concentrant les classes aisées, le Sud les classes pauvres, l'Ouest les classes moyennes, les fonctions tertiaires supérieures migrant à la fin du siècle depuis le centre historique vers le Nord le long de l'avenue Caracas.

L'analyse des relations entre les prix fonciers, les usages des sols et les densités brutes montrent d'une part que **le prix foncier et la rentabilité économique de l'usage des sols sont étroitement reliés** et d'autre part que **cette rentabilité peut être due à un usage des sols plus intense** se traduisant par une densité plus forte **ou un usage des sols mieux valorisé** ne se traduisant pas nécessairement dans une densité plus forte. Ces résultats suggèrent que **les décisions de localisation des classes aisées déterminent la distribution spatiale des prix fonciers, et par là la structure urbaine de Bogota.** Ainsi la distribution spatiale des prix fonciers et donc **le marché foncier sont actifs dans le processus de structuration urbaine.**

Enfin nous observons **une correspondance étroite entre les valeurs foncières et le niveau de desserte en transport, synonyme d'accessibilité**.

2) Evolution sur la période 1970 - 2000 des loyers et des prix d'achat-vente de l'immobilier ancien et neuf

Jaramillo (Jaramillo, 2004) met en parallèle deux bases de données : les statistiques du Département Administratif National de Statistique (DANE) sur les prix de l'immobilier ancien et neuf, et un recueil de l'évolution des loyers publiés dans les journaux - effectué par le centre de recherche CEDE de l'université des Andes, Bogota.

a) Tendance générale

Jaramillo (Jaramillo, 2004) montre que, sur la période 1970 – 2000[65] :

- Les loyers et les prix d'achat-vente de l'immobilier ancien et neuf connaissent sur le long terme (1970 – 2000) une tendance à la baisse en terme réel ;

- Cette baisse sur le long terme est respectivement plus forte pour les loyers puis l'immobilier ancien et enfin l'immobilier neuf ;

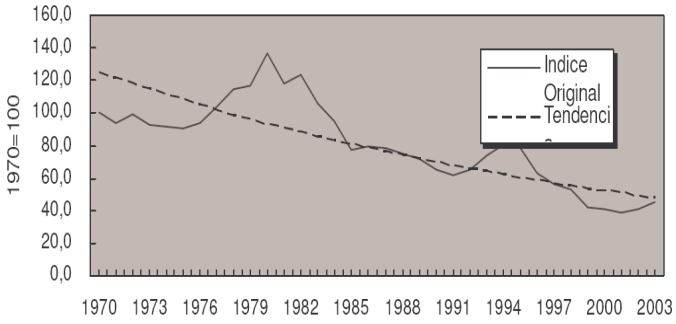
Jaramillo observe une diminution en moyenne sur l'agglomération des loyers de -2,89% par an, des prix de l'immobilier ancien de -2,01% par an, et des prix de l'immobilier neuf de -1,99% par an. Ainsi en terme réel, à la fin du 20ème siècle, les loyers et les prix d'achat-vente, de l'ancien et du neuf, oscillent entre 40% et 50% des prix de ceux atteint en 1970, et autour du tiers des prix les plus hauts, atteints au début des années 1980.

[65] Nous nous limitons ici l'analyse à la période 1970 – 2000. L'étude des marchés foncier et immobiliers après 2000 fera l'objet du chapitre 4 de cette thèse.

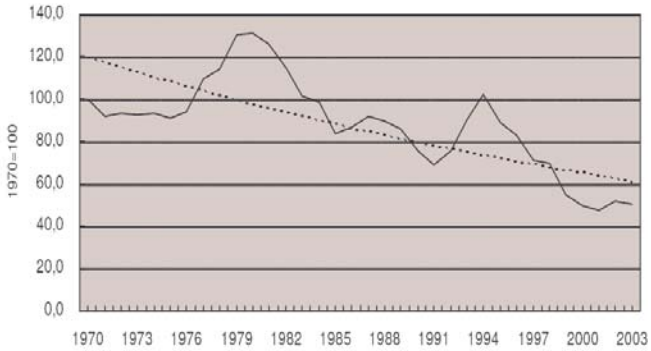
Ce résultat **traduit une augmentation du pouvoir d'achat** respectivement plus importante pour les locataires, les acheteurs de résidences anciennes et enfin les acheteurs de logement neuf. Afin d'avoir une idée de la relation entre l'évolution des loyers et celle des salaires des habitants de Bogota, Jaramillo (Jaramillo, 2004) effectue une comparaison entre le niveau du salaire minimum et le loyer d'une résidence représentative de celles occupées par les classes pauvres (deux pièces, secteur populaire). Jaramillo constate que le loyer de cette résidence représentative correspondait à 44 salaires minimum journaliers dans les années 1970, 63 salaires minimum journaliers au début des années 1980 lorsque les loyers étaient au plus haut, et seulement 26 salaires minimum journaliers en 2000. **Cette augmentation du pouvoir d'achat peut être reliée à l'essor de la production immobilière et au système de crédit hypothécaire UPAC** mis en place au début des années 1970.

Les graphes 20 et 21présentent l'évolution sur la période 1970-2003 des loyers et des prix achat-vente pour l'immobilier ancien.

Graphe 20 : Loyer réel et tendance (moyenne)



Graphe 21 : Prix moyen de l'immobilier ancien



Source : Jaramillo, 2004

- Pour les trois marchés, la baisse sur le long terme est plus accentuée pour les quartiers aisés que les quartiers pauvres ;

Jaramillo observe que, sur les trois marchés, l'intensité de la baisse sur le long terme est proportionnelle aux caractéristiques socio-économiques de la population résidente. Les prix dans les « beaux quartiers » connaissent une baisse plus accentuée que dans les quartiers de moindre standing. Ainsi les loyers décroissent avec un taux annuel de -3,08% dans les quartiers aisés, de -2,79% dans les quartiers occupés par les classes moyennes et enfin de -2,33% dans les quartiers plus pauvres. De même les prix de l'immobilier ancien et ceux du neuf décroissent respectivement avec des taux de -2,27% dans les quartiers aisés, de -1,84% et -1,90% dans les quartiers classe moyenne et enfin de -1,27% dans les quartiers plus pauvres.

Tableau 27 : Tendances de long terme des prix immobiliers réels. 1970 - 2003

TENDENCIAS DE LARGO DE LOS PRECIOS INMOBILIARIOS REALES EN BOGOTA 1970-2003 Tasa promedio equivalente anual				
	Alquileres	Precio Vivienda Usada	Precio Vivienda Nueva	Tierra destinada a vivienda
Promedio	-2,89	-2,01	-1,99	3,60
Ingresos Altos	-3,08	-2,27	-2,27	5,08
Ingresos Medios	-2,79	-1,84	-1,90	1,65
Ingresos Bajos	-2,33	-1,27	-1,27	2,21

Source : Jaramillo, 2004, à partir de données du DANE et du CEDE, Universidad de Los Andes.

Ce résultat est difficile à interpréter du fait du processus de « retour à la ville » et de la recomposition interne décrits précédemment. Nous pouvons tout de même supposer que la baisse plus accentuée dans les « beaux quartiers » que dans les quartiers populaires s'explique par le fait que pour la première fois à partir des années 1970 les populations riches font appel à la promotion immobilière – achetant des résidences dans des lotissements sécurisés - et non plus à des architectes particuliers, plus chers.

b) Cycles

Jaramillo (Jaramillo, 2004) montre que, sur la période 1970 – 2000[66] :

- Ces tendances de fond connaissent des cycles parallèles sur les trois marchés ;

Jaramillo observe une évolution cyclique parallèle sur les trois marchés, avec deux périodes de prix plus élevés : la première au début des années 1980 et la seconde au milieu des années 1990. La récession la plus forte et la plus prolongée de l'ensemble de la période pour les trois marchés fait suite au pic de 1994. Nous pouvons noter que la série de prix de l'immobilier ancien se caractérise par une phase d'expansion intermédiaire, de plus faible amplitude, avec un maximum en 1989 que l'on ne retrouve pas dans la série des loyers (elle se perçoit uniquement dans les loyers de strates élevées). En termes relatifs, par rapport à la tendance de fond à la baisse, les déviations cycliques sont similaires sur les trois marchés et plus importantes pour le maximum de 1994. Le maximum atteint au début des années 1980 représente une déviation par rapport à la tendance sur le long de 34,8% pour le prix de l'immobilier ancien. De même, le maximum atteint au milieu des années 1990 représente une déviation par rapport à la tendance sur le long de 39,8% pour le prix de l'immobilier ancien.

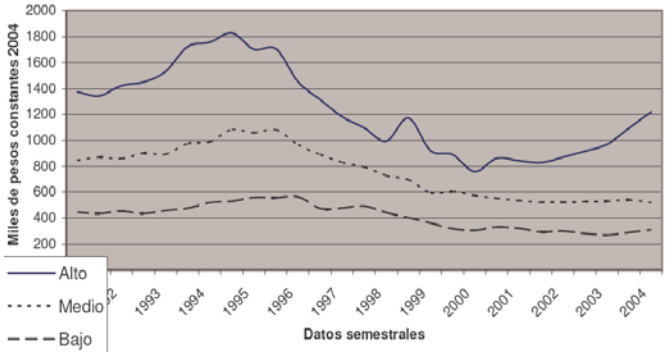
- Les cycles sont similaires pour tous les quartiers, quelque soit le niveau économique de la population résidante,

- L'amplitude de ces cycles est par contre plus forte dans les quartiers riches, à la hausse comme à la baisse.

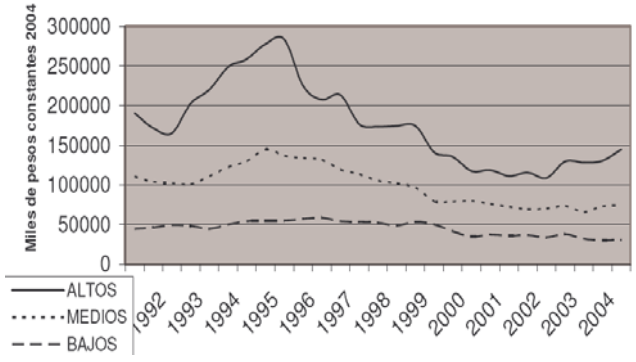
Cette différence dans l'évolution de long terme entre les quartiers de différents standing se retrouve dans les cycles de moyen terme. Les prix sur les trois marchés évoluent à la hausse comme à la baisse avec plus d'intensité au fur et à mesure que le standing du quartier augmente.

Les graphes ci-dessous présentent l'évolution sur la période 1970 – 2003 des loyers et des prix de l'immobilier ancien pour les différentes strates de populations.

Graphe 22 : Loyers réels selon le niveau socioéconomique des quartiers

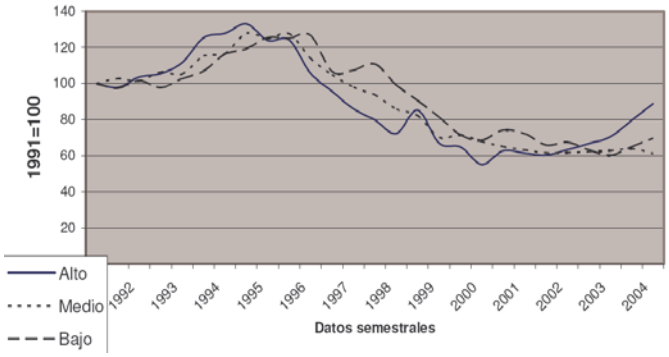


Graphe 23 : Prix moyens de l'immobilier ancien selon le niveau socioéconomique des quartiers



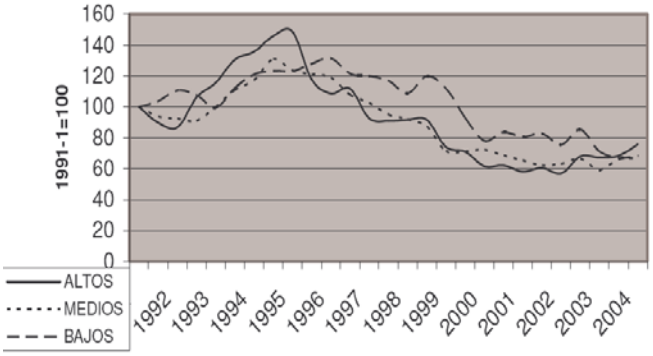
[66] Nous limitons ici l'analyse à la période 1970 – 2000. L'étude des marchés foncier et immobiliers après 2000 fera l'objet du chapitre 4 de cette thèse.

Graphe 24 : Evolution des loyers par rapport à 1991 selon le niveau socioéconomique des quartiers



Source : Jaramillo, 2004

Graphe 25 : Evolution des prix moyens de l'immobilier ancien par rapport à 1991 selon le niveau socioéconomique des quartiers



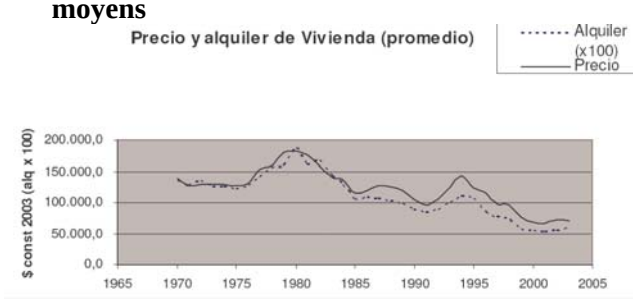
c) Articulations entre le marché locatif et le marché immobilier ancien

Jaramillo (Jaramillo, 2004) compare la série temporelle du prix moyen d'achat-vente dans l'immobilier ancien avec celle du loyer moyen sur la période 1970 - 2000. Il constate deux résultats intéressants :

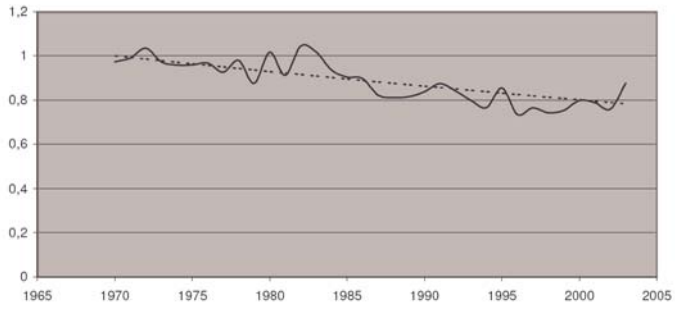
- Le premier est la similitude des deux séries dans leurs oscillations ; ce qui signifie que **les deux marchés du logement existant** - ou les deux formes de circulation des logements existants - **ont une connexion étroite**.

- Le second résultat est que les séries, tout en conservant une forme similaire, connaissent une progressive divergence, notamment à partir de 1985. Alors que les deux séries se superposent parfaitement dans les années 1970, au fur et à mesure que l'on avance dans le temps la série du loyer moyen décroche et se place sur des niveaux inférieurs de prix.

Graphe 26 : Comparaison de l'évolution entre les prix immobiliers moyens et les loyers moyens



Graphe 27 : Evolution du rapport entre le loyer et le prix immobilier (en moyenne)

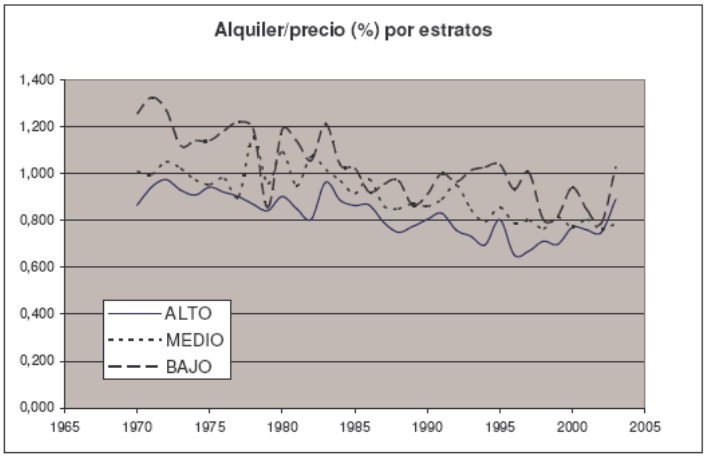


Source : Jaramillo, 2004

Le second résultat signifie que **le loyer représente une proportion progressivement moindre du prix d'achat-vente.** En effet, en moyenne cette proportion est passée de 0,964% dans les années 1970 à 0,783% dans les années 1990. Jaramillo (Jaramillo, 2004) conclut d'ailleurs sur un constat de rentabilité décroissante des investissements dans l'immobilier locatif. Nous pouvons émettre l'hypothèse que ce résultat s'explique par l'essor de la production immobilière adossée au système UPAC permettant une production massive de logements, à l'achat et à la location, et donc le passage d'une offre restreinte de logements au début des années 1970 à une offre progressivement abondante. Les résultats des recensement successifs semblent appuyer cette hypothèse : le pourcentage de propriétaires reste stable, entre 42 et 46%, de 1951 à 1973, puis augmente fortement pour atteindre 57,1% en 1985 et 54% en 1993 (Dureau, 2000).

Ensuite Jaramillo (Jaramillo, 2004) observe d'une part que **le loyer représente une proportion du prix d'achat-vente dans l'immobilier ancien plus importante dans les quartiers pauvres que dans les quartiers plus riches** et d'autre part que **cette divergence selon le standing des quartiers tend à se réduire durant la période 1970 – 2000**. Ainsi au cours de la décennie 1970, le poids des loyers par rapport au prix d'achat-vente était de 0,91% pour les quartiers aisés, 1% dans les quartiers classe moyenne et 1,17% dans les quartiers pauvres. Durant la décennie 1990, ce poids chute dans tous les quartiers mais l'ordre se conserve : 0,74% dans les quartiers aisés, 0,8% dans les quartiers classe moyenne et 0,92% dans les quartiers pauvres.

Graphe 28 : Evolution du rapport entre le loyer et le prix immobilier (en %) selon le niveau socioéconomique du quartier



Source : Jaramillo, 2004

d) Articulations entre les marchés immobiliers ancien et neuf

Jaramillo (Jaramillo, 2004) effectue une comparaison identique entre la série temporelle des prix d'achat-vente de l'immobilier ancien et de l'immobilier neuf. Il observe que les deux séries se superposent parfaitement. Elles présentent des oscillations très similaires, aussi bien en amplitude que en temporalité. Ce résultat montre une **connexion étroite entre les marchés de l'immobilier ancien et de l'immobilier neuf**, ceci malgré le fait que les déterminants des coûts pour le vendeur sont a priori différents sur les deux marchés de l'immobilier ancien et de l'immobilier neuf. Nous pouvons donc supposer que la demande de logements ne différencie pas significativement ces deux marchés, ce qui expliquerait la connexion des prix.

3) Evolution sur la période 1970 - 2000 des prix fonciers

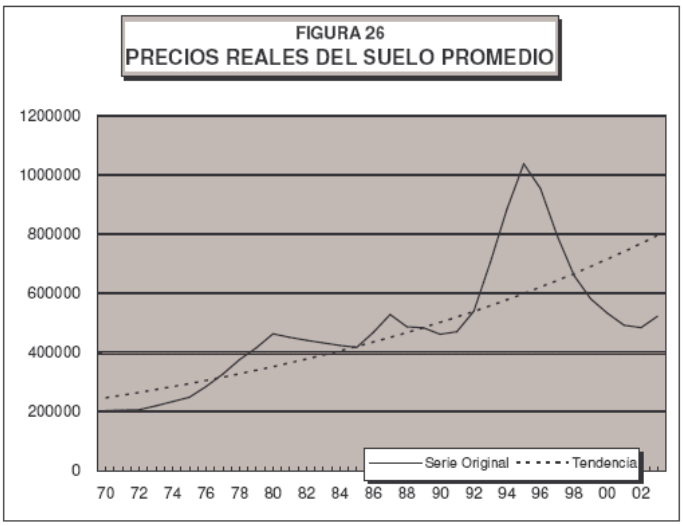
a) Tendance générale

Contrairement aux marchés immobiliers analysés précédemment, **les prix fonciers connaissent en moyenne une forte tendance à la hausse sur l'ensemble de la période 1970 – 2000**. Le taux de croissance annuel moyen est de +3,6% sur la période 1970-2003 (Jaramillo, 2004). Garza et Montana (Garza, Montana, 2000) confirment ces résultats : ils observent une hausse de +1,86% sur la période 1960-1998. Cette différence dans les taux moyens de croissance s'explique par le fait que le début des années 1960 et la fin des années 1990 sont des années de prix bas dans les cycles des prix fonciers. Ainsi le prix moyen de la terre est en 2003 deux fois et demie plus élevé que le prix moyen au début des années 1970.

Cette dynamique contraste donc fortement avec l'évolution des marchés du locatif, de l'immobilier neuf et ancien dont les taux de croissance annuelle sur la même période sont respectivement de -2,89%, -2,01% et -1,99%, et les prix réels en 2003 atteignent respectivement de 45,1%, 50,1% et 52% de ceux du début des années 1970 (Jaramillo, 2004).

Nous analysons ce contraste ci-dessous (cf. IV.C.4).

Graphe 29 : Prix foncier moyen. 1970 - 2002

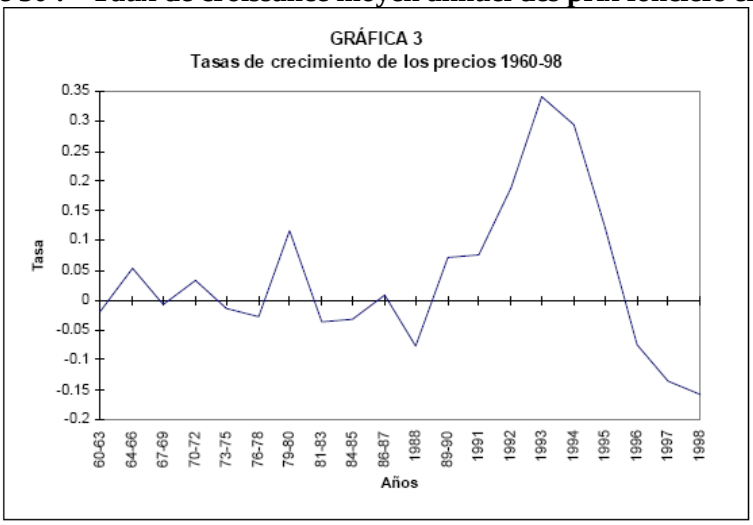


Source : Jaramillo, 2004

b) Cycles

La croissance du prix moyen de la terre n'a pas été constante. **Nous pouvons distinguer cinq cycles de croissance- décroissance des prix fonciers** : 1960-1967, 1968-1975, 1976-1981, 1982-1988 et 1989-1998.

Graphe 30 : Taux de croissance moyen annuel des prix fonciers entre 1960 et 1998



Source : Garza, Montana, 2000

Nous remarquons que **le dernier cycle (1989-1998) est particulièrement accentué**, avec en 1993 un maximum de croissance proche de 35%.

Deux hypothèses sont avancées dans la littérature pour expliquer l'ampleur de ce dernier cycle : un phénomène spéculatif ou la « cristallisation » dans le foncier d'une très forte croissance macro-économique. Nous discuterons ces hypothèses ci-dessous (cf. IV.C.4).

c) Distribution spatiale de cette croissance de long terme des prix fonciers

i) Selon le type d'usage des sols, sur l'ensemble de la période 1960 - 1998

En distinguant l'évolution des valeurs foncières selon l'usage (résidentiel, commercial et industriel) et le standing du quartier considéré (élevé, moyen, moyen bas et populaire), Garza et Montana (Garza, Montana, 2000) remarquent que **les taux de croissance les plus forts sur l'ensemble de la période 1960-1998 s'observent pour les usages commercial et résidentiel dans les quartiers de haut standing**, alors que **les taux de croissance les plus faibles se rencontrent dans le résidentiel des quartiers moyen bas et les usages industriels**. Ainsi les zones commerciales dans les quartiers de haut standing, résidentielles de haut standing et résidentielles de quartier moyen ont vu leurs prix multipliés respectivement par 10,79, 7,68 et 6,66. Seul **le prix du foncier au centre-ville est stable sur la période 1960-1998**.

Tableau 28 : Prix moyen (Pesos / m2) et taux de croissance annuel moyen 1960 – 1998

Secteur urbain		Prix	Taux de croissance
Centre		740.386	-0,05%
Commercial	Aisé	1.256.627	6,5%
	Populaire	526.641	4,6%
Résidentiel	Aisé	546.392	5,5%
	Moyen	196.188	5,1%
	Moyen – bas	145.563	3%
	Populaire	92.172	4%
Industriel		269.602	2,7%
Toute la ville (moyenne)		596.627	1,86%

Source : Garza, Montana, 2000. (Pesos constants 1998)

ii) Selon le type d'usage des sols, par phases

Garza et Montana (Garza, Montana, 2000) analysent le comportement par phase des valeurs foncières des différents types d'usage du sol. Les auteurs reprennent les trois grandes phases définies précédemment : 1960 – 1972 (lancement du système financier UPAC en 1972) ; 1973 – 1990 (apogée du système UPAC) ; 1991 – 1998 (cycle particulièrement accentué).

Garza et Montana observent que les prix augmentent pour tous les secteurs sur les trois périodes sauf pour le centre historique dont la valeur foncière moyenne sur la phase 1973 – 1990 est inférieure à celle sur la phase 1960 - 1972.

Ensuite ils remarquent que les taux de croissance annuels moyens diminuent entre la phase 1960 - 1972 et la phase 1973 – 1990 pour tous les secteurs - et particulièrement pour le centre historique - sauf pour les secteurs résidentiels aisés, moyen-bas et pauvre où ils s'établissent déjà au niveau de la phase suivante.

D'autre part ils observent que les taux de croissance annuels moyens de la phase 1990 – 1998 sont similaires à ceux de la phase 1960 - 1972 pour le centre et les zones de commerces populaires et aisées, inférieurs pour les zones résidentielles moyennes et supérieurs pour tous les autres secteurs.

Similairement à ce que nous avions observé sur les marchés locatif et achat-vente d'immobilier neuf et ancien, la hiérarchie des taux de croissance sur le long terme en fonction du standing du quartier se retrouve dans l'intensité des cycles de moyen terme. Garza et Montana observent en effet que, aussi bien pour les usages résidentiels que commerciaux, les prix fonciers évoluent à la hausse comme à la baisse avec plus d'intensité au fur et à mesure que le standing du quartier augmente.

Tableau 29 : Prix fonciers (Pesos / m2) par secteur urbain et par phase sur la période 1960 - 1998

Secteur urbain		1960 - 1972	1973 - 1990	1991 - 1998
Centre		933.001	698.386	743.895
Commercial	Aisé	268.941	753.978	1.493.524
	Populaire	252.536	428.758	702.350
Résidentiel	Aisé	92.549	309.183	739.463
	Moyen	72.941	157.860	277.381
	Moyen – bas	55.420	94.008	176.528
	Populaire	35.381	64.727	108.787
	Aisé	127.266	156.121	309.603
Toute la ville (moyenne)		352.062	378.477	728.421

Source : Garza, Montana, 2000. (Pesos constants 1998)

Tableau 30 : Taux de croissance des prix fonciers (Pesos / m2) par secteur urbain et par phase sur la période 1960 - 1998

Secteur urbain		1960 - 1972	1973 - 1990	1991 - 1998
Centre		4,3%	- 4,7%	5,9%
Commercial	Aisé	11,8%	2,6%	10,3%
	Populaire	5%	1,7%	6,9%
Résidentiel	Aisé	2%	8%	7,7%
	Moyen	10,3%	2,6%	6,8%
	Moyen – bas	- 0,6%	5%	4,7%
	Populaire	0,8%	4,7%	5,2%
	Aisé	3,2%	1,5%	6,5%
Toute la ville (moyenne)		1,6%	0,1%	8,2%

Source : Garza, Montana, 2000. (Pesos constants 1998)

A partir de ces résultats, Garza et Montana établissent trois catégories de secteur urbain selon leurs comportements durant la phase 1970-1990 :

- les secteurs où les valeurs foncières et les taux moyens de croissance annuelle sont supérieurs durant la phase 1973 – 1990 à ceux de la phase 1960 – 1972 : les secteurs résidentiels (sauf le résidentiel moyen) et industriels ;
- les secteurs où seulement les valeurs foncières, mais pas les taux moyens de croissance annuelle, sont supérieures durant la phase 1973 – 1990 à ceux de la phase 1960 – 1972 : les secteurs de commerce et résidentiel moyen ;
- le secteurs où les valeurs foncières et les taux moyens de croissance annuelle sont inférieurs durant la phase 1973 – 1990 à ceux de la phase 1960 – 1972 : le centre historique.

iii) Selon le type d'usage des sols, sur le dernier cycle 1991 -1998

Garza et Montana (Garza, Montana, 2000) confirment ces résultats sur le dernier cycle (1991-1998) de la période considérée. Ils montrent que les secteurs commerciaux et résidentiels des « beaux quartiers » connaissent sur l'ensemble du cycle et sur la phase de croissance (1991-1995), les taux de croissance les plus forts, mais aussi les taux de décroissance les plus forts lors de la phase de récession.

Tableau 31 : Taux de croissance annuel moyen des prix fonciers (Pesos / m2) par secteur urbain et par phase sur la période 1991 - 1998

Secteur urbain		1991 - 1998	1991 - 1995	1996 - 1998
Centre		5,9%	15,1%	- 13,9%
Commercial	Aisé	10,3%	24,8%	- 13,9%
	Populaire	6,9%	13,9%	- 4,8%
Résidentiel	Aisé	7,7%	20,2%	- 13%
	Moyen	6,8%	16,8%	- 9,8%
	Moyen – bas	4,7%	11,1%	- 6%
	Populaire	5,2%	8,1%	0,4%
	Aisé	6,5%	17,4%	- 11,7%
Toute la ville (moyenne)		8,2%	20,5%	- 12,2%

Source : Garza, Montana, 2000. (Pesos constants 1998)

D'autre part Garza et Montana (Garza, Montana, 2000) montrent que

- Les zones Nord regroupant les quartiers résidentiels aisés et les activités tertiaires supérieures présentent les prix et les taux de croissance les plus élevés durant la phase ascendante du cycle 1991 - 1998 ;

- Le centre historique regroupant les commerces traditionnels et les institutions publiques, et les quartiers classes moyennes du Nord-Ouest présentent des prix et des taux de croissance annuelle modérés durant la phase ascendante du cycle (1991 – 1995) ;

- Les aires industrielles et le secteur résidentiel Sud, correspondant aux populations les plus pauvres, connaissent une faible valorisation foncière, et les prix les plus bas.

Enfin, ces auteurs mettent en avant **les faibles liens entre les taux de croissance du foncier résidentiel populaire et les cycles observés sur l'ensemble de l'agglomération**. En effet non seulement le secteur résidentiel populaire présente le plus faible taux de croissance durant la phase d'ascension des prix (1991-1995), mais en plus il est l'unique secteur a conservé un taux de croissance positif durant la phase de récession (+0,4%).

iv) Selon le degré de consolidation

Il faut garder à l'esprit que l'analyse de telles séries temporelles de prix fonciers sur une période longue est compliquée par le fait que certaines zones présentant aujourd'hui les valeurs foncières les plus élevées n'étaient pas urbanisées en 1960 ou 1970 (Centro Andino, Calle 100, Teleport Business). C'est pourquoi nous allons maintenant analyser l'évolution des prix fonciers en fonction du degré de consolidation des zones urbaines.

Nous distinguons les zones en processus de consolidation, les zones où existent des terrains vacants susceptibles d'être urbanisés, des zones consolidées, les zones où pour construire un nouvel édifice il est nécessaire de détruire l'existant. Un promoteur immobilier voulant construire dans une zone déjà consolidée nécessite un apport plus important en capital que s'il investissait dans une zone non consolidée.

L'hypothèse est que les valeurs foncières des nouvelles zones urbanisées croissent à des taux au moins équivalents si ce n'est plus forts que les secteurs urbains déjà consolidés.

Treffeisen (Treffeisen, 1992) observe en effet que durant les années 1980 les différences de taux de valorisation du foncier entre les zones centrales consolidées et les zones périphériques en consolidation étaient significatives au niveau résidentiel.

Tableau 32 : Taux de croissance annuel moyen des prix fonciers des secteurs résidentiels selon le degré de consolidation. 1980 - 1988

Zones	Aisées	Moyenne - haute	Moyenne	Moyenne - basse	Basse
Condolidées	4,2%	0,2%	- 5,7%	- 0,5%	3,9%
Non consolidées	4,2%	2,8%	1,8%	2,5%	6,2%

Source : Treffeisen, 1992, cité dans Garza, Montana, 2000.

Roda (Roda, 1999) analyse l'évolution des prix fonciers entre 1960 et 1997 et confirme cette hypothèse. Il croise les données statistiques de la LPRB avec les limites administratives des localités et montre que les localités considérées consolidées en 1960 (Santa Fe, Teusaquillo, Barrios Unidos) présentent une croissance faible, voire négative, alors que les localités qui se sont consolidées sur la période considérée (Usaquen, Suba, Rafael Uribe) présentent des taux de valorisation les plus importants.

Au contraire des deux auteurs précédents, Garza et Montana (Garza, Montana, 2000) infirment cette hypothèse sur la phase ascendante (1991 – 1995) du cycle fortement accentué de la dernière décennie du 20ème siècle. Garza et Montana observent en effet que les taux de croissance annuelle des valeurs foncières sont légèrement supérieurs dans les zones consolidées que dans les zones en consolidation. Ces auteurs estiment cependant que cette différence n'est pas significative et qu'il n'y a pas de certitude statistique qu'ils ne puissent pas être égaux.

Tableau 33 : Taux de croissance par zone selon le degré de consolidation. 1991 - 1995

Zones	1991	1992	1993	1994	1995	1991 - 1995
Condolidées	4,9%	12%	18,2%	16,3%	11,1%	12,4%
Non consolidées	6,5%	13,4%	21,2%	19,1%	10%	13,9%

Source : Garza, Montana, 2000.

v) Pour les périphéries

Garza et Montana observent que **le comportement des zones périphériques s'identifie à celui du centre secondaire auquel elles sont rattachées** : la périphérie Nord (jusqu'à Chia) connaît des valeurs foncières et des taux de croissance supérieurs à la périphérie occidentale (Cota, Madrid, Funza, Mosquera), et cette dernière que la périphérie Sud (Soacha et Usme).

vi) Conclusions

A partir des observations de Garza et Montana, nous souhaitons poursuivre notre analyse des relations entre le processus de structuration urbain et le marché foncier.

Nous pouvons émettre l'hypothèse que le comportement particulier des valeurs foncières dans le centre historique est lié à la perte progressive d'attractivité de cette zone pour les classes aisées depuis les années 1950 - 1960. En effet jusqu'à cette époque, le centre historique hébergeait les résidences et les commerces des populations riches et présentait des valeurs foncières les plus élevées de la ville, reflet de cette attractivité. Ensuite, le centre s'est progressivement dégradé, les populations riches ont migrés vers le Nord, les activités tertiaires les ont suivi, et les valeurs foncières du centre ont chuté.

Réciproquement les terrains qui accueillent aujourd'hui les populations aisées et présentent des prix fonciers très élevés à la fin du 20ème siècle, étaient en processus de consolidation lorsque les populations riches migrèrent du centre vers le Nord. Cela explique d'une part la faible valeur foncière moyenne de ces zones comparativement au centre mais aussi à l'ensemble de la ville durant la première phase 1960 – 1972 et d'autre part leurs forts taux de croissance annuelle moyens durant les deux phases suivantes.

Enfin nous pouvons émettre l'hypothèse que l'appréciation des valeurs foncières du centre historique durant la phase 1990 – 1998 peut s'expliquer évidemment par l'emballement des marchés sur l'ensemble de la ville mais aussi par la concentration durant cette phase de nombreux commerces et services visant les classes moyennes et pauvres. Il est en effet frappant de constater que les valeurs foncières dans le centre historique à la fin du 20ème siècle sont très proches de celles des secteurs de commerces populaires ; et plus précisément légèrement supérieures, ce qui pourrait s'expliquer par la plus grande accessibilité du centre historique, nœud des réseaux de transport.

Nous pouvons donc conclure que

- les évolutions des valeurs foncières dans les différentes zones de la ville sont interdépendantes ;

- le comportement particulier des valeurs foncières dans le centre historique, mais aussi des secteurs concentrant aujourd'hui les classes riches seraient donc à la fois le reflet et la cause des dynamiques urbaines analysées précédemment. Le retour à la ville des populations aisées marquant une trêve dans la périphérisation continue, combinée à la micro-ségrégation et à la recomposition interne permise par l'essor des promoteurs immobiliers engendrent une plus grande attractivité pour les investisseurs de ces « nouveaux beaux quartiers ».D'autre part la dégradation de la centralité historique - qui connaît dans un premier temps la migration vers le Nord des populations aisées et du tertiaire supérieur et dans un deuxième temps la concentration d'activité populaire - est à relier avec la stabilité des prix fonciers dans le centre historique sur l'ensemble de la période 1970 – 2000 et la forte valorisation du foncier commercial et résidentiel des quartiers de haut standing (au Nord du centre historique).

4) Articulations entre le marché immobilier et le marché foncier : reflet des dynamiques urbaines sur la période 1970 - 2000

Jaramillo (Jaramillo, 2004) compare les déviations des prix fonciers et des prix de l'immobilier neuf par rapport à leurs tendances de long terme respectives. Il observe que, malgré des tendances divergentes sur l'ensemble de la période 1970 - 2000, les déviations cycliques des prix fonciers et des prix de l'immobilier neuf par rapport aux tendances de long terme coïncident. **Ainsi les cycles de moyen terme des prix fonciers et des prix de l'immobilier neuf sont similaires en temporalité et en amplitude**. Nous pouvons cependant noter que durant le cycle des années 1990, les oscillations relatives du prix foncier sont plus amples, aussi bien en son pic supérieur que à son niveau le plus bas.

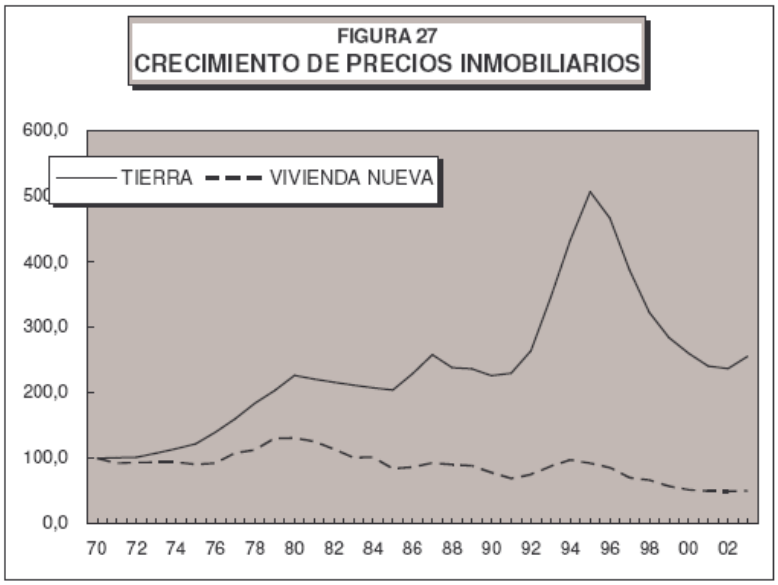
Par contre, nous avons vu précédemment **une divergence significative entre les tendances de long terme (1970 – 2000) sur le marché immobilier (à la baisse) et le marché foncier (à la hausse)**. L'explication de cette divergence est délicate mais quelques réflexions peuvent être proposées. Jaramillo (Jaramillo, 2004) émet deux hypothèses.

Une première explication possible serait une augmentation de la densité de construction. Une intensification de l'usage des sols, par élévation des constructions, expliquerait la divergence de prix entre le marché immobilier et foncier. Cette hypothèse concorde avec la « tendance au retour à la ville » des classes aisées et moyennes durant la période 1970-2000 exposée dans le chapitre 3, IV. Et en effet la production en hauteur a proliféré, particulièrement dans les quartiers aisés.

Nous pouvons interpréter cette hypothèse au travers de deux mécanismes définis par Renard (Renard, 2003) : le « compte à rebours » et le « multiplicateur foncier ». Selon le premier mécanisme le promoteur détermine, à partir des prix de marché des produits immobiliers le montant qui peut être consacré au terrain (à la charge foncière) (Renard, 2003). La valorisation de l'usage du foncier obtenue par densification – même si individuellement les prix des biens immobiliers baissent – se répercuterait donc, via le mécanisme du compte à rebours en une appréciation des prix fonciers. Le second mécanisme, le « multiplicateur foncier » (Renard, 2003) permet de comprendre comment une plus grande valorisation sur les marchés immobiliers se répercute de façon accentuée sur les marchés fonciers. Dans le bilan d'une opération, les coûts de construction, les frais financiers, les impôts et participations divers varient peu à court terme. Dès lors, pendant la phase ascensionnelle du cycle, la hausse du prix du mètre carré construit produit un effet hypertrophié sur le foncier. Si par exemple la part du foncier entre pour 20 % dans le coût total d'une opération, une augmentation de 20 % du prix de demande de l'immobilier (l'offre restant à peu près stable à court terme en raison de l'inertie du processus de production) conduit à une hausse du prix du terrain qui peut avoisiner 100 %.

La deuxième hypothèse proposée par Jaramillo (Jaramillo, 2004) est une réduction progressive des bénéfices réalisés par les promoteurs immobiliers. Ces bénéfices étaient en effet « exceptionnellement élevés » au début de la période 1970 -2000 (Jaramillo, 2004).

Graphe 31 : Croissance du prix foncier



Source : Jaramillo, 2004

Si ces hypothèses contiennent une partie de l'explication, l'amplitude de la divergence laisse à penser qu'elles ne suffisent pas. Nous nous permettons alors d'émettre à notre tour quelques pistes de réflexion, sous forme d'hypothèses.

Une troisième hypothèse est une transformation structurelle dans le marché du logement : d'une situation initiale, au début des années 1970, caractérisée par une offre de logement très restreinte qui permettait des bénéfices pour les promoteurs immobiliers et des prix immobilier et locatif élevés, le marché du logement a évolué vers une situation symétrique caractérisée par une offre plus abondante qui abaisse les prix immobilier et locatif. Cette hypothèse concorde avec l'essor de la production immobilière capitaliste à partir des années 1970 exposé dans le chapitre 3, IV. Cet essor de la production capitaliste de logement aurait ainsi provoqué d'une part une offre de logement plus importante et donc une baisse des prix immobilier et locatif, et d'autre part une concurrence plus forte sur le marché foncier et donc une hausse des prix fonciers. La conjugaison de ces deux mouvements des prix tend à réduire les bénéfices réalisés par les promoteurs immobiliers, ce qui poussent ces derniers à investir une plus grande partie de leurs capitaux dans le marché foncier, à la hausse et considéré plus sûr, et ainsi à alimenter la croissance des prix fonciers. Jaramillo (Jaramillo, 2004) observe d'ailleurs que les prix de l'immobilier chutent avec une plus grande intensité dans les quartiers aisés et que, en parallèle, ce sont ces mêmes quartiers aisés qui voient le prix du foncier croître le plus fortement. Nous pouvons donc penser que le mécanisme suggéré dans la seconde hypothèse opère avec plus d'intensité sur ce sous-marché.

Une quatrième hypothèse est la conjugaison de l'accessibilité à la terre et de la forte croissance démographique qu'a connu Bogota durant toute la période 1970 – 2000. Gilbert et Ward (Gilbert, Ward, 1985) soulignent en effet que, relativement à d'autres mégapoles de pays en développement, les urbanisations par invasion de terrain urbain sont rares à Bogota. Ainsi la quasi-totalité des populations nouvellement arrivées à Bogota durant cette période a dû accéder à la terre par un mécanisme de marché, incluant les sous-marchés illégaux (pirates). Ce qui signifie que la pression sur le foncier urbain a été particulièrement forte et explique les prix particulièrement élevés du foncier à Bogota.

Une cinquième hypothèse est l'existence d'un mouvement spéculatif sur le marché foncier durant le dernier cycle, 1991-2000 (avec un maximum de croissance proche de 35% en 1993). Cette hypothèse s'appuie d'une part sur la forte amplitude des déviations des prix fonciers par rapport à leur tendance de long terme, plus forte que les déviations observées pour les prix immobilier et locatif, et d'autre part sur le léger déphasage au sommet des cycles entre les différentes séries. Les prix fonciers continuèrent à croître, et de façon significative +17,3% (Jaramillo, 2004), une année après le début de la chute des prix de l'immobilier et du locatif.

Cette hypothèse est très discutée dans la littérature analysant le marché foncier à Bogota à la fin du 20ème siècle.

Jaramillo et Parias écartent cette hypothèse d'un phénomène spéculatif, notamment parce que les prix élevés ne se sont pas maintenus suffisamment longtemps (un an) après l'écroulement des prix de l'immobilier neuf et de l'activité de construction immobilière en 1993 (Jaramillo, Parias, 1998). Selon ces auteurs, il apparaît plus juste de considérer l'amplitude du cycle comme la « cristallisation » dans le foncier d'une très forte croissance macro-économique durant cette période. Ces auteurs soulignent que le PIB régional croissait en moyenne de 8,2% par an durant la première partie des années 1990. Rappelons que le taux de croissance annuel des prix fonciers était lui de 20,5%, ce qui est largement supérieur …

Garza et Montana (Garza, Montana, 2000) rejettent de même l'hypothèse d'une bulle foncière mais pour une autre raison. Ces auteurs considèrent que l'on pourrait interpréter cette croissance vertigineuse des prix fonciers comme un phénomène de spéculation sur la valeur foncière si les taux de croissance étaient significativement supérieurs dans les secteurs urbains en processus de consolidation à ceux dans les zones déjà consolidées[67]. Ce qui n'est pas le cas, comme nous l'avons présenté précédemment. Ces auteurs considèrent alors qu'il serait « prématuré » d'affirmer qu'il a existé un phénomène spéculatif.

Sans chercher à trancher ce débat, nous souhaitons ajouter qu'il est souvent ressorti au cours des entretiens que nous avons effectués en 2006 à Bogota auprès de différents acteurs que si ce cycle vertigineux coïncide avec l'ouverture économique de la Colombie et une forte croissance macro-économique, cette envolée des prix fonciers à Bogota correspond aussi à l'essor du narcotrafic en Colombie. Il nous a été souvent rapporté le rôle clef joué par les narcotrafiquants cherchant à blanchir des capitaux tout aussi vertigineux.

Enfin une sixième hypothèse s'appuyant sur l'effet de « cliquet à la baisse » décrit par Renard (Renard, 2003) peut être avancée. Selon Renard, le fonctionnement des marchés fonciers ralentit le retour à l'équilibre par un « effet de cliquet », traduisant le comportement de propriétaires fonciers, personnes physiques ou personnes morales, qui ne souhaitent pas remettre leurs terrains sur le marché dans le climat qui succède à la phase haussière du cycle. Il en résulte une raréfaction de l'offre de terrains et une tension à la hausse sur leurs prix. Les niveaux anormaux atteints par les prix fonciers conduisent ainsi à une rétention accrue dans la phase décroissante du cycle, et à un effet amortisseur à la hausse lors de la reprise. Selon Renard (Renard, 2003), cet effet de « cliquet à la baisse » n'est pas de même nature que le « multiplicateur foncier », il ne résulte pas d'un mécanisme de nature économique, mais bien plutôt d'un effet de psychologie collective, d'un comportement d'attentisme fondé sur la simple extrapolation de prix qui avaient atteint des niveaux anormaux.

Photo 14 : Centre ville historique de Bogota

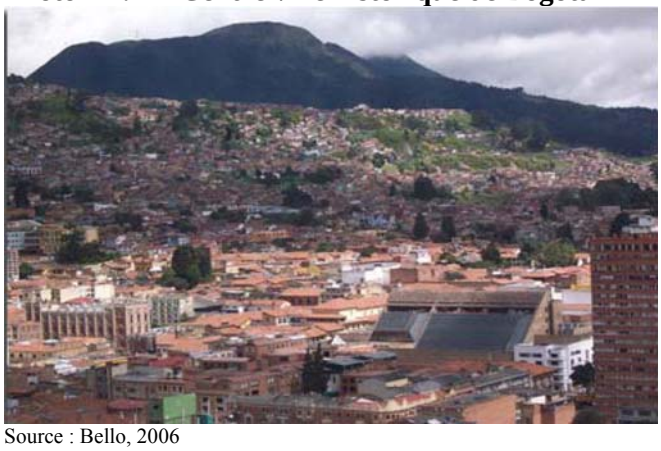
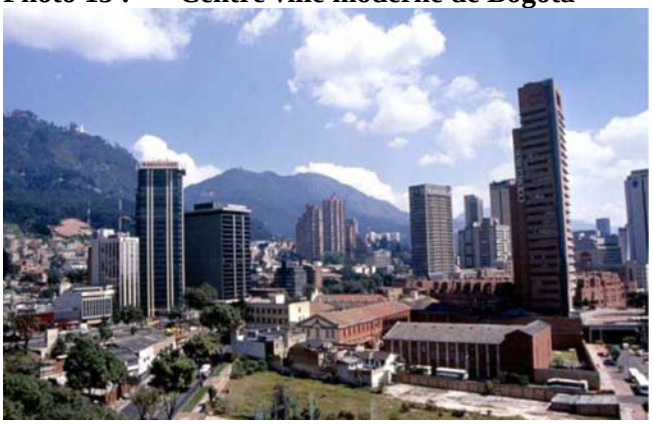


Photo 15 : Centre ville moderne de Bogota



Source : Bello, 2006

[67] Ces auteurs s'appuient ainsi sur une des définitions proposées par Roehner (Roehner, 1999) pour déterminer s'il y a ou non spéculation sur les prix fonciers.

5) Conclusions

Nous retenons plusieurs enseignements de cette analyse des relations entre les marchés foncier, immobiliers et les dynamiques de structuration urbaine sur le temps long et à la fin du 20ème siècle.

Tout d'abord les différents marchés foncier et immobiliers sont étroitement connectés.

Nous avons vu en effet que, si les tendances de long terme peuvent diverger, les cycles de moyen terme sont similaires, en amplitude comme en temporalité ; ce qui montre que les trois marchés du logement – et notamment les deux formes de circulation des logements, le locatif et l'achat-vente – sont étroitement connectés. De même si les tendances de long terme sont opposées entre l'évolution des marchés immobiliers et foncier, les oscillations de moyen terme montrent un lien étroit entre les dynamiques de prix des logements et des terrains les supportant.

Ensuite les divergences dans les tendances de long terme des marchés immobiliers et foncier peuvent s'expliquer par les évolutions dans les relations fonctionnelles entre le couple « transport –usages des sols ».

Nous avions vu précédemment que la dégradation de la mobilité, l'essor de la production immobilière, la mise en place du système de crédit hypothécaire UPAC, le libéralisme de la planification urbaine, etc. sont interdépendants et co-déterminés et ont engendrés de nouvelles dynamiques de structuration de l'espace urbain. Nous venons de voir que tous ces éléments se traduisent dans les dynamiques de long terme des différents marchés du logement et de la terre.

Enfin les marchés immobilier et fonciers sont actifs dans le processus de structuration urbaine.

Nous avons vu en effet que les prix fonciers et la rentabilité économique de l'usage des sols sont interdépendants et co-déterminés. D'autre part les décisions de localisation des investissements résidentiels et commerciaux sont influencés par la distribution spatiale des activités et des populations héritée de l'histoire urbaine, puis déterminent à leur tour la distribution future des fonctions urbaines. De même nous avons mis en exergue une relation étroite entre les valeurs foncières et le niveau de desserte en transport, synonyme d'accessibilité.

Ainsi l'étude de la distribution spatiale des prix fonciers à la fin du 20ème siècle et des évolutions sur la période 1970 – 2000 des prix immobiliers et fonciers nous enseigne que **les dynamiques des marchés fonciers et immobiliers sont à la fois le reflet et des causes du processus historique de structuration urbaine.**

V - Analyses des causes et réponses à la crise de la mobilité

Dans cette section nous discutons les analyses développées à la fin du 20ème siècle sur les causes de la crise de la mobilité présentée dans la section IV et les réponses apportées par les autorités publiques.

A - *Les causes de la crise de la mobilité à la fin des années 1990*

1) Taux de motorisation et mobilité à la fin des années 1990

Une étude de l'IGP (IGP-NAM-EGI-SICITER, 1997) montre (tableau 34) que le parc automobile de Bogota est relativement faible comparativement à un échantillon représentatif des mégapoles mondiales.

Tableau 34 : Mobilité et motorisation pour diverses villes mondiales 1992

Ville	Population	Déplacements totaux par jour	Déplacements par habitants par jour	Motorisation pour 1000 habitants
Bogota	5 284 311	9 406 073	1,78	94
Caracas	2 929 320	4 562 554	1,56	195
Rio de Janeiro	9 807 000	13 940 000	1,42	153
Buenos Aires	12 395 587	18 050 000	1,46	209
Lima	7 531 100	10 490 000	1,39	64
Santiago de Chile	4 820 000	7 366 516	1,53	200
Barcelona	3 037 763	5 025 600	1,65	395
Paris	7 960 000	14 300 000	1,80	540
Londres	6 731 000	11 680 000	1,74	495
Chicago	7 745 109	18 588 262	2,40	n.c.
Los Angeles	9 409 227	28 133 588	2,99	556
San Francisco	4 547 792	15 462 492	3,40	657
Philadelphia	5 548 789	13 594 533	2,45	408

Source : IGP-NAM-EGI-SICITER, 1997

Cette observation donne à penser que **la cause de la crise de la mobilité à la fin du 20ème siècle ne réside pas dans un taux de motorisation trop important**.

De même l'étude IGP (tableau 34) montre que le taux de déplacement journalier à Bogota se situe légèrement au dessus de ceux d'autres mégapoles sud-américaines ; il est équivalent à celui des villes européennes et inférieur au taux de déplacement dans les villes états-uniennes. **La congestion du système de transport ne résiderait donc pas dans une mobilité excessive.** Nous pouvons toutefois nous interroger sur la capacité du réseau routier urbain de Bogota à supporter un taux de déplacement proche de celui de certaines villes du Nord.

2) Une offre de voirie suffisante

Ardila (Ardila, 1998) compare (tableau 35) la taille du parc automobile, la longueur du réseau viaire urbain (en km–voie) et la quantité de véhicules par kilomètre de voie urbaine pour la ville de Bogota et plusieurs zones urbaines des Etats-Unis. Ces statistiques montrent la faiblesse du réseau viaire développé (en km–voie) à Bogota mais aussi le faible taux de charge de ce réseau (en voiture par km-voie). La quatrième colonne indique en effet le nombre de véhicules qui doivent se partager, en moyenne, un kilomètre de voie urbaine. Cet indicateur constitue une mesure du niveau de congestion de la voirie installée[68]. Ainsi **la taille du parc automobile de Bogota apparaît réduite par rapport à la capacité installée de la trame viaire qui lui est offerte**.

Cette analyse est critiquable puisqu'elle ne prend pas en compte les caractéristiques de la voierie analysée : les villes états-uniennes possèdent des autoroutes et des voies express que Bogota ne possède pas. Cependant l'analyse menée par Ardila nous semble valide car : i) les autoroutes urbaines sont une partie minime du réseau viaire d'une ville (Stares, 1996), ii) au final l'ensemble du trafic urbain débouche sur des voies de moindres importances, iii) en prenant la totalité des voies urbaines, on considère la possibilité que les véhicules ont d'utiliser n'importe quelle voie urbaine.

[68] Nous expliquons plus loin la différence faite par Ardila (Ardila, 1998) entre la capacité installée et la capacité effective de la trame viaire.

Tableau 35 : Voierie urbaine à Bogota et dans zones urbaines des USA (1992)

Etats Villes	Nombre de véhicules	km-voie de la voirie urbaine	Véhicules par km-voie de voirie urbaine
Bogota (Guhl et Oachon, 1992)	650 000	16 390	39,7
Bogota (Trujillo, 1995)	650 000	10 500	61,9
Rhode Island	699 210	156 184	4,8
Texas	13 681 735	295 192	46,3
Florida	10 369 395	174 547	59,4
Massachusetts	4 501 969	68 518	65,7
New Jersey	5 906 316	85 443	69,1
California	22 431 749	318 251	70,5
Illinois	8 973 009	126 824	70,8
New York	10 274 036	145 128	70,8
Pensylvanie	8 480 526	115 357	73,5
Virginia	1 425 209	10 909	130,6
Total USA	201 530 021	2 943 973	68,5

Source : Ardila, A., 1998

En ce qui concerne la répartition modale de l'occupation de la voie, une étude du bureau d'étude Steer, Davies&Gleave montre que 64% de la voirie est occupée par les véhicules privés et seulement 27% par les transports collectifs (Chaparro, 2002). C'est-à-dire que la majorité de l'espace public viaire est consacré au transport privé qui ne sert le déplacement que d'environ 15% de la population.

Ainsi, à la fin des années 1990, **le parc automobile présent à Bogota est relativement faible au regard de la population et du réseau routier qui lui est offert.** Il apparaît donc surprenant que la ville connaisse un niveau de congestion et des temps de déplacement si élevés.

3) La gestion du réseau routier

Un comité d'experts fut mandaté en 1995 pour examiner les causes – sur lesquelles les autorités pouvaient intervenir à court terme - de la congestion routière à Bogota (Comite de Expertos, 1995). Cinq causes principales furent avancées. Elles concernent toutes la gestion de l'infrastructure routière.

a) Le réseau de feux rouges : la « vague rouge »

La mauvaise synchronisation du réseau de feux rouges et la non-adaptation des logiciels aux conditions changeantes du trafic sont selon le comité d'experts la principale cause de la congestion routière à Bogota. Le réseau de feux fonctionne en alternatif, c'est-à-dire que les feux adjacents montrent des indications contraires. Le résultat final est que le flux de véhicule rencontre une « vague rouge », ce qui diminue la fluidité du trafic. Un système simultané où tous les feux d'une voie passeraient simultanément au vert, offrira une « vague verte » qui rendrait les flux quasi-continus.

Gouarne (Gouarne, 1992) montre à partir de l'analyse d'expériences menées dans d'autres villes que l'optimisation de l'usage du réseau routier existant permet une augmentation de la capacité de charge de la voirie de 20% ou plus.

b) Le design et l'état de la voierie

Selon le groupe d'experts les deuxième et troisième causes sont liées à l'état des voies et à leur design. Les trous, les inondations de la chaussée suite à la moindre pluie et les rétrécissements que génère le mauvais design des routes interrompent le flux de véhicule, réduisent la capacité du système viaire et augmentent le degré de congestion.

c) Les arrêts de bus

La quatrième cause selon les experts concerne le manque d'un réseau organisé d'arrêts d'autobus qui permettrait de faciliter l'accès des passagers et de diminuer les interférences avec le flux de voitures.

d) Le stationnement illégal sur la voie et les trottoirs

Enfin le comité d'experts pointe les stationnements illégaux sur les voies et les trottoirs qui sèment le chaos dans les flux de véhicules et de piétons, provocant des interférences entre véhicules et entre véhicules et piétons, et augmentant ainsi la congestion.

4) Le manque de capacité financière

Jusqu'à la réforme introduite par le nouveau statut de Bogota en 1993 (cf. encadré), les administrations districtales avaient adopté un schéma selon lequel les investissements se finançaient à crédit. Le déficit devenait alarmant et en 1992 ce modèle n'était plus soutenable (Ardila, 2004). La faiblesse financière affectait le fonctionnement et le développement du système de transport de la ville. Le financement de l'entretien des routes était difficile, ce qui se traduisait par une stratégie de laisser les voies se détériorer à un tel point qu'il était nécessaire de les reconstruire entièrement (Ardila, 2004). Si cette stratégie permettait des économies à court terme, elle engendrait des coûts bien plus élevés à long terme ; mais étant donné que la loi colombienne interdit aux maires de se présenter pour deux mandats[69] consécutifs… mieux valait laisser le maire suivant payer la note (Ardila, 2004). Les zones nouvellement incorporées à la ville se développaient sans l'infrastructure routière nécessaire. C'est par exemple le cas de l'ouest de Bogota qui s'urbanisa sans que les avenues Ciudad de Cali et Cundinamarca soient construites. Le résultat fut une sur-charge de l'avenue Boyaca, unique alternative disponible, ce qui se traduisit à terme par une détérioration plus rapide de la chaussée.

Les réformes de collecte des impôts locaux de 1993 ont largement amélioré les revenus du district de Bogota qui put progressivement financer ses investissements sur fonds propres. En 1992, les entrées d'argent finançaient à peine le fonctionnement. En 1996, seulement 68% du budget était consacré au fonctionnement. Malgré la considérable amélioration de la situation financière de la ville durant la seconde moitié des années 1990, la capacité de financement restait faible face aux besoins de la ville. Le retard cumulé durant des années dans le financement et l'entretien du réseau de routes font que en 1997 le Plan de Transport Urbain (JICA, 1996) estimait à 143 millions d'Euros l'investissement annuel que la ville devait réaliser.

Encadré 12 : Réformes institutionnelles durant les années 1990

Les réformes institutionnelles menées durant les années 1990 sont un élément central dans l'histoire des transports à Bogota. En effet elles ont non seulement permis une prise de pouvoir politique de la mairie sur la destinée de la capitale mais lui ont aussi donné les capacités financières pour mener ses politiques.

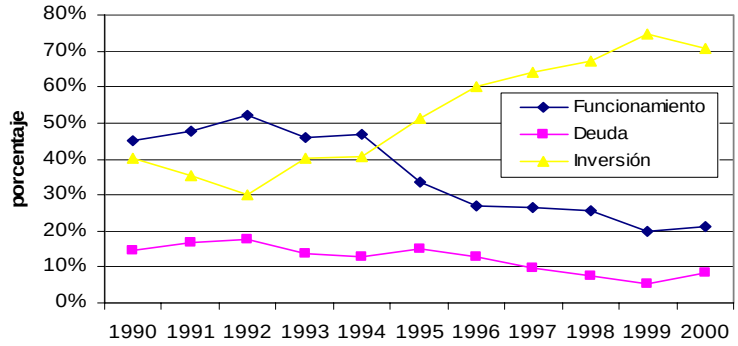
L'initiateur de ces réformes est Jaime Castro, maire de Bogota entre 1992 et 1994 ; il réalisa une réforme de la charte politique de la ville et des principaux éléments du code fiscal. La charte de la ville datant de 1968 créait un conseil municipal très puissant et un maire en position de faiblesse. Ce régime de co-administration répartissait les pouvoirs législatifs et exécutifs de manière inégale. Castro obtint la révision de cette charte en 1993, délimitant le pouvoir législatif et de contrôle politique du conseil et donnant un réel pouvoir exécutif au maire.

La nouvelle charte réforma aussi la législation fiscale. Les taxes foncières participaient marginalement au budget de la ville du fait que le cadastre était périmé depuis longtemps. Le remettre à jour était trop coûteux financièrement et politiquement. Aussi la nouvelle charte de Bogota établit que les propriétaires eux-mêmes devaient apprécier leurs propriétés et ainsi renouveler le cadastre. En ce qui

[69] Les mandats de maire sont de trois ans à Bogota.

concerne les taxes sur les commerces, la nouvelle charte établit que les commerçants devaient payer cette taxe tous les deux mois et non comme avant une fois par an. Le paiement annuel incitait les commerçants à minimiser leur revenu pour le mois servant d'assiette fiscale au calcul de la taxe. En payant cette taxe tous les deux mois, cette incitation était éliminée. Nous pouvons remarquer que **la réforme fiscale se focalise sur les mécanismes de collecte des taxes et non sur l'augmentation de ces taxes**.
En parallèle, l'administration de la ville suivit une politique de réduction et de priorisation de ses dépenses.
Ensemble ces réformes institutionnelles décidées en 1993 et mises en œuvre dès 1994 permirent d'augmenter considérablement la capacité de financement de la ville. Cependant à partir de 1997 le taux de croissance du budget de la ville décroît et les administrations se voient obligées d'augmenter les taxes foncières, de recourir à de nouvelles taxes comme les taxes sur l'essence, et de privatiser les entreprises détenues par la ville. Les taxes sur l'essence ont été particulièrement dynamiques.

Evolution des dépenses municipales 1990 – 2000



source : Fondation Ciudad Humana

5) Le manque de ressource humaine de l'administration

Depuis les années 1980, les différentes études sur le système de transport pointe du doigt le besoin d'**améliorer la capacité de gestion des institutions en charge des transports urbains**. D'une part toutes ces études recommandent la création d'une autorité unique afin que le design des politiques et la planification soient coordonnés. D'autre part ces études préconisent le recrutement de plus de personnel technique et des programmes de qualification. Pourtant ces recommandations n'ont jamais été mises en œuvre. Par exemple la signalisation de la voirie –c'est-à-dire la gestion de 35.000 intersections, 800 feux rouges et plus de 1000 panneaux de signalisation – était dans les années 1990 à la charge de trois personnes (Ardila, 1998). Ces derniers devaient s'occuper des demandes des citadins, repérer les problèmes, décider des solutions et les mettre en place. A ce manque de personnel il faut ajouter le manque d'outils à leur disposition – modèles, collecte d'information, ordinateurs – qui aggravait la situation.

Les conséquences de ce manque de capacité de gestion sont néfastes pour le bon fonctionnement du système de transport. En premier lieu l'absence de planification ne permet pas de prévoir les situations futures, de décider des stratégies pour éviter les difficultés ni de les mettre en oeuvre. Ce qui se pratique à Bogota jusqu'à la fin du 20ème siècle ressemble plus à une « politique de pompier » (Montezuma, 2000).

6) L'administration et la planification du système de Bus

a) Une organisation inefficace conduisant …

Pour comprendre les problèmes de transport à Bogota jusqu'à la fin du 20ème siècle, et notamment l'ampleur du rôle joué par le système de bus dans ces difficultés, mais aussi le

bouleversement des règles du jeu permis par la mise en place du TransMilenio, il est important d'analyser dans le détail les relations entre l'état, la mairie de Bogota, les propriétaires des bus et les conducteurs (graphe 32).

Le gouvernement national, au travers du ministère des Transports et du congrès, est responsable de la régulation – en termes généraux - de la fourniture de transport collectif. Par exemple, c'est lui qui détermine la durée maximale pendant laquelle un bus peut fournir un service de transport en commun.

Le Secrétariat au Trafic et au Transport (STT) est une agence du gouvernement de la ville. Ces responsabilités incluent l'émission et l'application des réglementations spécifiques à Bogota mais aussi de celles issues du gouvernement central. Le STT est en charge d'autoriser la création des compagnies de bus et de les superviser. Il est aussi responsable de l'ouverture d'une nouvelle ligne de bus, des fréquences et du type bus avec lequel la compagnie devra exploiter cette ligne. En théorie, le STT est l'autorité centrale en charge de la planification et de la gestion de la fourniture du service de bus. Le STT n'a pourtant pas les capacités organisationnelles pour assumer ces responsabilités, en particulier pour superviser les compagnies de bus et faire appliquer les normes (Chaparro, 2002 ; Ardila, 2004). Cela se traduit dans l'inorganisation et l'inefficacité du système de transport collectif et dans la grande corruption qui y règne.

Immédiatement en dessous du STT dans l'organigramme viennent les compagnies de bus qui ont les droits sur les itinéraires décidés par le STT. La loi colombienne n'autorise que des compagnies de bus à fournir un service de transport collectif. En théorie, la loi oblige les compagnies à posséder au moins 10% de leur flotte. En pratique, 96% des compagnies de bus possèdent moins de 10% des bus (Ardila, 2004) ; ce qui montre la faible capacité du STT à faire appliquer la loi. Ainsi les actifs des compagnies de bus sont les lignes de bus - les droits à opérer – et elles louent ces licences aux propriétaires des bus qui par la loi ne peuvent opérer sur une ligne sans être affiliés à une compagnie. L'affiliation implique que le propriétaire paye non seulement la licence pour chaque bus opérant sur une ligne mais aussi un droit d'affiliation annuelle à la compagnie. Les compagnies ont donc une incitation à augmenter le nombre de lignes de bus offertes par le STT. Du fait de ses faiblesses organisationnelles, le STT n'a pas les moyens de détecter le besoin d'une nouvelle ligne. Ce sont généralement les compagnies qui, individuellement, mènent les études pour montrer l'existence d'une demande insatisfaite. La compagnie présente cette étude au STT qui émet un appel d'offres. En théorie les compagnies intéressées participent aux enchères et le STT choisit le gagnant. En pratique, la compagnie qui présente l'étude initialement gagne les enchères (Ardila, 2004). Ceci permet et explique d'une part la place laissée à la corruption et d'autre part les relations fortes entre les entrepreneurs immobiliers et les compagnies de bus (Ardila, 2004). La compagnie fait ensuite la publicité de cette nouvelle ligne pour attirer les propriétaires de bus. Il résulte de cette organisation que la croissance du revenu des compagnies est directement reliée au nombre de bus affiliés à la compagnie et complètement séparé du nombre de passagers que ces bus transportent.

Pour augmenter leur efficacité à influencer la régulation, les compagnies appartiennent à des syndicats de compagnies de bus. Le plus important, Conaltur, regroupe 60% des compagnies de bus colombiennes (Ardila, 2004). Ces syndicats sont généralement dirigés par le directeur de la compagnie la plus importante. Toutes les sources confirment le pouvoir de ces syndicats et leur efficacité à modifier les règlementations en la faveur des compagnies de bus. Si le gouvernement de la ville essaie de mettre en place une nouvelle régulation, le ministre des transports, sous la pression des syndicats, peut intervenir afin de défendre les intérêts des opérateurs : ce fut le cas lorsque les propriétaires de bus obtinrent le droit d'utiliser les bus jusqu'à l'âge 30 ans, alors que 15 ans était la norme en vigueur (Ardila, 2004).

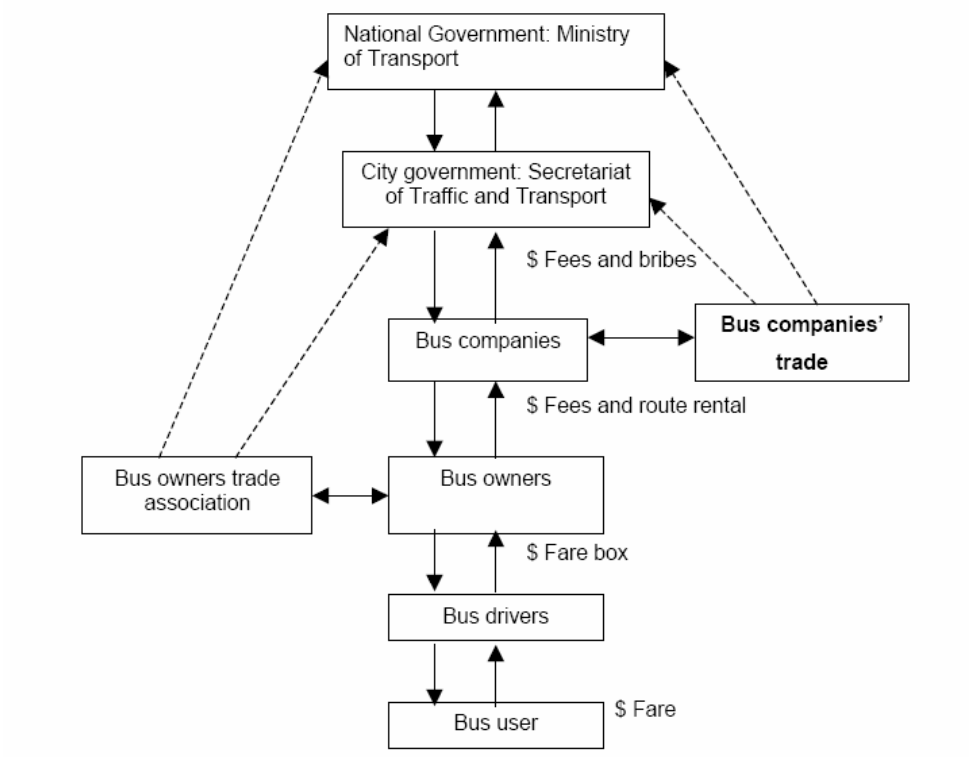
Ainsi **les compagnies ne sont pas responsables de la fourniture du service de transport ; ce sont des intermédiaires entre les gouvernements et les propriétaires de bus.** Ces derniers sont les véritables fournisseurs du service. Ils investissent la plus grande part du capital et prennent les décisions critiques comme de savoir quand et où maintenir un bus. Pour pouvoir fournir le service, il leur est donc indispensable de s'affilier à l'une des 64 coopératives qui détiennent le droit d'opérer sur les 628 itinéraires existants (Chaparro, 2002). Ils demandent à la compagnie de leur fournir des itinéraires avec un volume et une rotation de passagers élevés – deux caractéristiques déterminant le revenu final. Il résulte de cette organisation que le revenu des propriétaires de bus est lié à la rentabilité des itinéraires sur lesquels ils opèrent ; ce qui entraîne une concentration des itinéraires passant par le centre ville et les corridors où la demande est plus forte, notamment l'avenue Caracas.

On estimait en 1998 qu'il y avait 20764 bus et 25000 propriétaires. 2% des propriétaires possédaient plus de 10% des bus et 85% des propriétaires possèdent un seul véhicule ou moins (Chaparro, 2002).

Cette forte atomisation de la propriété rendait difficile les interactions entre les propriétaires et le gouvernement. Les syndicats de compagnies de bus représentent les intérêts des compagnies, certains propriétaires se sont alors regroupés en un syndicat de propriétaires, Apetrans, afin de défendre leurs intérêts propres.

Etant donné les arrangements organisationnels, les conducteurs de bus – généralement engagés par le propriétaire du bus - deviennent les acteurs clefs dans la fourniture du service de transport. Avec un seul chauffeur par bus, celui-ci devait non seulement conduire mai aussi collecter l'argent des usagers, et cela entre 13 et 14 heures par jour. Pour motiver le conducteur à maximiser le revenu total, les propriétaires payent le chauffeur sur la base d'une commission par passager.

Graphe 32 : Relations entre le gouvernement de la ville, les compagnies de bus et les propriétaires de bus et les usagers à Bogota en 1997



Source : Ardila, 2004

b) … à la guerre du centime …

Cette situation devrait se traduire par une saine compétition, augmentant l'efficacité du système. En effet on peut noter que les tarifs sont toujours restés relativement bas. Pourtant la compétition est si forte entre les conducteurs qu'elle a conduit à ce qui est connu comme «la guerre du centime[70]». **La « guerre du centime » incite les chauffeurs à adopter des conduites de plus en plus périlleuses pour collecter le maximum de passagers et gagner la commission correspondante, le « centime »** (Ardila, 2004). De même cette « guerre du centime » encourage les chauffeurs à ne pas respecter ni les horaires ni les arrêts de bus. La montée et la descente du bus deviennent alors particulièrement dangereuses étant donné que le chauffeur s'arrête n'importe où et pour un temps très court. Pour gagner la compétition, les chauffeurs bloquent les autres bus et s'engagent dans des courses sans aucune sécurité. En 1998, il y eut 52.762 accidents et 1.174 morts sur les routes de

[70] «la guerra del centavo»

Bogota (Ardila, 2004). Parfois si le nombre de passagers est trop faible, le conducteur fait descendre tous les voyageurs du bus et fait demi-tour pour collecter les passagers dans l'autre sens.

c) … et à la sur-offre et à la dégradation du service de bus, cercle vicieux au détriment de l'usager

Ensuite cette organisation institutionnelle constitue une incitation d'une part à augmenter le nombre de bus en circulation et d'autre part à concentrer les itinéraires sur un petit nombre de corridors – ces deux stratégies conduisant à une sur-offre qui crée la congestion et aggrave d'autant la guerre du centime (Ardila, 2004). Les compagnies de bus ont intérêt à augmenter le nombre d'itinéraires pour attirer plus de propriétaires de bus qui vont payer pour opérer sur ces itinéraires. En 2000, il y avait 631 lignes autorisées et 95 non-autorisées (Ardila, 2004).

Puisque la demande de transport ne croît pas aussi rapidement que l'offre, ajouter des bus diminue le revenu et la profitabilité pour les propriétaires. Les compagnies de bus ont résolu ce problème en usant de leur influence sur le STT pour que la structure tarifaire prenne en compte le nombre de passagers : si la capacité du bus décroît, le prix augmente. Cela explique que, en 1998, un bus transportait en moyenne seulement 350 passagers par jour[71] (Ardila, 2004). De même le tarif a augmenté, entre 1993 et 1997, de 83% en termes réels afin de compenser le moindre nombre de passagers par bus (Ardila, 2004). On peut donc considérer que les usagers ont subventionné l'inefficacité du système.

Les propriétaires de bus ont subventionné le reste du coût de la sur-offre et de l'inefficacité du système, en ne couvrant pas la dépréciation des bus. Les propriétaires ont ainsi cannibalisé leurs actifs.

Les acteurs étaient incités à perpétrer les arrangements organisationnels même s'ils conduisaient à la mort du système de transport collectif. Les compagnies voulaient créer plus de lignes. Les propriétaires voulaient étendre l'âge légal d'utilisation d'un bus afin de continuer à gagner la rente sans couvrir la dépréciation du véhicule. Les chauffeurs voulaient charger le maximum de passagers. Les intérêts privés pour conserver le statut-co étaient forts. Les usagers étaient captifs du système de bus, ne pouvant pas s'offrir une voiture.

7) Conclusions

Ainsi les différentes analyses menées dans les années 1990 convergent sur le constat que la cause principale des problèmes de transport à Bogota est le manque de capacité de gestion de la part des autorités pour planifier, administrer et opérer le système de transport de la ville. Les études réalisées par l'IGP et Ardila montrent que la voirie installée à Bogota est suffisante pour supporter la taille du parc automobile et la mobilité des citadins. Mais le manque de ressources humaines et financières combiné à une organisation institutionnelle inadéquate génère un cumul tel de problèmes que la capacité effective du système routier à Bogota est bien inférieure à la capacité installée. D'autre part l'organisation institutionnelle inefficace du service de transport collectif conduit à une sur-offre et à la dégradation de la qualité du service de bus au détriment des usagers.

La crise de la mobilité à Bogota à la fin du 20ème siècle n'est donc pas considérée par les analystes comme un problème technologique ou de sous équipement en infrastructure de transport. Les études réalisées dans les années 1990 et présentées ici mettent d'abord en avant les **carences organisationnelles pour expliquer la forte congestion de Bogota.**

Les analyses développées dans les sections précédentes de ce chapitre nous permettent toutefois d'ajouter à ces causes institutionnelles de la congestion le rôle joué par l'évolution de la structure urbaine : la ségrégation sociale - et par là la concentration des propriétaires d'automobiles au Nord - et la polarisation fonctionnelle de la ville génère une matrice Origine – Destination concentrant les déplacements sur quelques corridors. La progressive condensation urbaine de la fin du 20ème siècle accentua ce phénomène.

[71] alors que les standards internationaux sont autour de 1000.

B - *La longue marche jusqu'au projet TransMilenio*

A la fin du 20ème siècle, Bogota présente les caractéristiques nécessaires à la mise en place d'un système de transport de masse performant : les dynamiques historiques de structuration urbaine ont fait de Bogota une ville significativement dense et 70% des déplacements se font en transport collectif, pourtant l'efficacité et le service offert par le système de bus sont d'un niveau particulièrement faible.

Depuis le début des années 1980, plusieurs études et projets ont été élaborés – en vain - pour mettre en place un système de transport de masse efficace pour la ville de Bogota. La planification des transports à Bogota a été tiraillée entre deux écoles de pensées, chacune avec ses urbanistes et ses hommes politiques[72]. La première estime qu'un métro doit être la colonne vertébrale du système de transit complémenté par un service de bus. La seconde école pense que les bus en sites propres et plus tard les Bus Rapid Transit (BRT) peuvent satisfaire la demande de mobilité sans avoir besoin d'une solution rail onéreuse.

1) «Faire l'Histoire» : les multiples projets de Métro pour la capitale

L'idée de construire un métro à Bogota a été étudiée de nombreuses fois avant même d'être inscrite dans l'agenda politique de la ville ou de la nation.

Durant la présidence de Julio Cesar Turbay (1978 – 1982), le maire de Bogota, Hernando Duran, fut chargé de réaliser diverses études en vue de la construction d'une ligne de métro nord- sud. Du point de vue financier (Gilbert, Davila, 2002), les études proposèrent d'augmenter de façon significative les taxes et de diminuer les subventions à l'essence – deux sources de financement que l'on retrouvera jusqu'à la construction du TransMilenio.

Le métro fut inscrit pour la première fois dans l'agenda politique de Bogota sous le mandat présidentiel de Virgilio Barco (1986 – 1990) - ancien maire de Bogota de 1966 à 1969. Les études réalisées proposèrent d'utiliser les lignes de chemins de fer inter-municipales ; si elles ne correspondaient pas aux principales origines et destinations des déplacements quotidiens, l'utilisation de ces lignes de chemins de fer présentait l'avantage de diminuer considérablement le coût du projet puisque les terrains étaient déjà propriété du gouvernement (Acero et al., 1999).

La première élection pour la mairie de Bogota eut lieu en Mars 1988. Elle porta au pouvoir le conservateur Andrés Pastrana, fortement opposé au président libéral Barco. Jaime Ruiz et Jorge Acevedo, ingénieurs et conseillers transport du nouveau maire, furent les artisans d'une stratégie d'opposition au projet métro du président Barco et de promotion d'une option bus en site propre. Acevedo, au travers de différentes études sur les transports à Bogota réalisées pour la présidence, avait déjà eu l'occasion d'expliquer que le principal problème était le manque de capacité institutionnelle pour planifier et gérer un système de transport efficace. Acevedo considérait les bus en sites propres comme un bon catalyseur pour mettre en place les changements institutionnels nécessaires. Selon Ruiz, à cette époque «la planification des transports comportait une dichotomie, soit on construit un métro, soit on construit des autoroutes ; il n'y avait pas de chemin intermédiaire. De plus, autoroutes et métros étaient l'objet d'un lobbying intense de la part des équipementiers internationaux ; ce qui faussaient le processus de décision local»[73]. Ruiz et Acevedo mirent au point une stratégie politique nourrie d'arguments techniques pour dérouter le projet métro : le temps étant un facteur critique dans le projet de Barco, ils introduirent des délais prétextant la nécessité de nouvelles études pour améliorer le tracé du métro ; s'appuyant sur l'expérience du Brésil – notamment Sao Paulo et Curitiba – ils présentèrent l'option bus en sites propres comme une alternative viable. Cette pression permit d'inscrire le bus en sites propres à l'agenda politique de la ville ce qui déboucha sur la construction de la Troncal Caracas en 1990, présentée dans l'encadré 13.

[72] Pour une analyse exhaustive (et passionnante) du rôle joué par les politiciens, les urbanistes et les ingénieurs transport dans l'histoire de planification des transports de Bogota : Ardila, 2004.

[73] Interview recueillie par Ardila (Ardila, 2004)

Jaime Castro fut élu maire de Bogota en 1992. Castro subit la pression des urbanistes et ingénieurs de son administration pour continuer la construction de sites propres pour bus et le lobby des entreprises étrangères pour construire un métro. Une étude réalisée en 1992 par un groupe d'experts chargé des transports conclut que le prochain corridor à équiper de voies de bus en site propre devait être la calle 80, qui part de l'extrême nord de l'avenue Caracas vers l'ouest de la ville le long d'un axe en peuplement. Etant donné le contexte, Acevedo et Ruiz adoptèrent la stratégie suivante : ils persuadèrent Castro d'adopter un schéma de concession pour la future infrastructure de transport. Une concession nécessitait une information de bonne qualité afin de minimiser les risques et forçait les promoteurs du métro à une plus grande honnêteté dans leur proposition ; de plus cette stratégie permettait d'ouvrir la voie à d'autres technologies – bus en sites propres et Bus Rapid Transit (BRT). L'appel à proposition fut remporté en Octobre 1994 par Métrobus avec un projet de BRT qui entrait pour la première fois dans l'agenda politique de la ville. Pour autant beaucoup de points importants restaient en suspens et après une longue négociation le projet fut abandonné en Avril 1996.

Quand Antanas Mockus fut élu pour la première fois à la mairie de Bogota en Janvier 1995, il était face à un contrat de concession pour un projet BRT avec Métrobus et une pression du nouveau président Samper pour construire un métro avec le soutien du gouvernement central.

Samper, ancien membre du conseil de la capitale, avait fait du métro de Bogota une composante centrale de sa campagne présidentielle. Pour comprendre son acharnement à promouvoir un métro pour Bogota, rappelons nous que Samper est le président tristement connu en Colombie comme à l'étranger pour ses liens avec les narco-trafiquants ; ce qui lui valu la négation de son visa aux Etats-Unis. Lors d'une réunion avec Mockus, Samper dit «Antanas, faisons l'Histoire en commençant la construction du métro»[74] … L'objectif de Samper était aussi que son mandat marque l'Histoire d'un legs plus honorable.

Mockus considérait dans son plan d'action « Former une ville »[75] que les priorités en matière de transports étaient i) d'augmenter la capacité institutionnelle des administrations en charge des transports urbains ii) d'établir un Master Plan de Transport de long terme afin de répondre à la demande de transports des citadins iii) de mettre en place un méga-projet de «Système Intégré de Transport de Masse» (SITM). Le plan «Former une ville» ne précisait pas spécifiquement si le SITM devait reposer sur une option rail ou bus.

Le contentieux entre le gouvernement central et la mairie de Bogota se cristallisa dans la définition des termes de références de l'étude financée par JICA pour établir le Master Plan de Transport. Samper voulait que l'étude porte sur la faisabilité de la première ligne de métro ; la ville voulait que l'étude JICA prenne en compte d'autres solutions techniques et porte sur un système intégré de transport et non juste sur une ligne de métro. Un compromis fut trouvé en Décembre 1995 ; un consortium IBS - Ingetec (Colombia), Bechtel (USA) et Systra (France) - fut chargé de réaliser l'étude. Les recommandations de IBS confortèrent Mockus dans l'idée qu'un système de bus était la meilleure alternative et que le métro devait être construit plus tard quand la demande le justifierait.

Cette étude fut réalisée entre 1996 et 1998. Finalement, ce plan ne fut pas implémenté mais fut intégré dans le programme politique « Pour le Bogota que nous voulons[76] » mis en œuvre par Enrique Penalosa à partir de Janvier 1998 et posa les bases pour la construction du BRT TransMilenio.

[74] Rapporté dans (Ardila, 2004). Pour l'histoire, Mockus répondit «nous ferons l'Histoire si nous construisons un système de bus, pas le métro».

[75] «Formar Ciudad».

[76] « Por el Bogota que queremos » (Penalosa, 1997).

Encadré 13 : La « troncal de la Caracas »

La « troncal de la Caracas » est la première initiative de voies en site propre pour bus réalisée à Bogota. Ces voies réservées aux bus, séparées de la circulation des véhicules privés, furent réalisées sur l'avenue Caracas parce qu'elle traverse la ville du Nord au Sud et concerne la demande de transport la plus élevée. Un volume important de bus transitait par cette avenue. Les objectifs de sa construction étaient d'une part de modifier les relations contractuelles entre les différents acteurs du système de transport et d'autre part d'améliorer la circulation des bus, diminuer les temps de trajet, augmenter la qualité du service et réduire la pollution locale. Un objectif secondaire était d'engager une récupération de l'espace public et stopper sa détérioration (Ardila, 2004).

Quand le groupe d'experts commença à travailler sur le projet en Mai 1989, il ne restait au maire Pastrana que un an avant la fin de son mandat. Aussi celui-ci décida d'une part de ne construire que les 8 premiers kilomètres de la troncal – les plus au sud, à partir du centre ville - et d'autre part d'abandonner l'ambition institutionnelle (Ardila, 2004). Le projet rencontra alors deux problèmes majeurs :

1) Quels bus pourraient utiliser la troncal ? En effet pour satisfaire l'importante demande de transport sur ce corridor – 24.000 passagers par heure et par direction, aux heures de pointe – la troncal nécessitait l'utilisation d'un petit nombre de bus de forte capacité. Réduire le nombre de bus empruntant la troncal permettait d'éviter les embouteillages et de diminuer les temps d'arrêt aux stations.

2) Que faire des bus qui circulaient sur l'avenue Caracas et qui ne seront pas autorisés à utiliser la troncal ? Les compagnies et les propriétaires utilisant les busetas d'une capacité de 30 passagers devaient donc se reporter sur d'autres corridors, moins rentables. La réorganisation des lignes de bus pour garantir la rentabilité à tous fut un point critique du projet.

Les premiers 8 kilomètres furent inaugurés en Mars 1990. La seconde phase du projet – 8 km prolongeant au nord la première phase – furent réalisé avec l'aide d'un prêt de la Banque Mondiale ; les travaux commencèrent en Novembre 1991, 8 mois avant la fin du mandat municipal de Caicedo (Acevedo, 1996).

La construction des 16 km fut terminée en 1992, réservant deux voies par direction pour les bus et deux voies par direction pour les véhicules particuliers. Les voies en site propre étaient complétées par un système de 60 arrêts, tous les 500 mètres, en plateforme pour la montée et la descente des passagers. Ces derniers continuaient à payer au chauffeur à l'entrée du bus.

Finalement, tous les bus qui empruntaient auparavant ce corridor furent autorisés à emprunter la troncal, avec pour seule restriction d'avoir une capacité minimale de 80 passagers. Les réformes institutionnelles nécessaires furent ainsi complètement abandonnées.

Les résultats furent une amélioration de la vitesse moyenne aux heures de pointes, passant de 10 km/H à 17 km/H pour les bus et à 21 km/H pour les véhicules particuliers. Le nombre de passagers augmenta à 31.000 par direction, durant les heures de pointe (Ardila, 2004). Ces bénéfices se traduisirent en une diminution du temps de déplacement pour les usagers, une réduction des coûts d'opération pour les bus, une chute du nombre d'accidents, une diminution de la pollution et une sécurisation de ce corridor.

La dégradation puis l'échec de la troncal Caracas se doit principalement à un défaut de coordination entre les différentes entités. Quand le projet fut implémenté, il fut imaginé de créer un Groupe Inter-institutionnel de Transport (GIT) et une nouvelle Autorité Unique de Transport (AUT), qui ne réussirent jamais à se consolider (Ardila, 2004). La gestion et l'entretien furent confiés à des entités de transports existantes et peu efficientes. Le manque de clarté sur les responsabilités de l'administration et de l'opération de la troncal entraîna une dégradation des spécificités de fonctionnement qui constituaient son intérêt et sa réussite. Le nombre de bus empruntant la troncal augmenta progressivement, aucune maintenance des voies et des infrastructures ne fut entreprise. La guerre du centime continuant faute de réforme institutionnelle, les bus s'arrêtaient plusieurs fois par arrêts de bus et en dehors des arrêts afin de collecter le maximum de passagers (Ardila, 2004).





Source : Ardila, 2004 ; Bello, 2006

2) La décision de construire un BRT

TransMilenio prit place dans l'agenda politique de Bogota en 1998, la construction débuta en Décembre 1999 et les trois premiers corridors ouvrirent en Décembre 2001. Programmé en quatre phases, sa construction doit s'achever en 2016 et se trouve actuellement en programmation de la troisième phase. L'investissement total prévu est de 2.300 millions USD pour 22 lignes couvrant 388 km (Ardila, 2004). Cette programmation par phase permet ainsi à la collectivité de lisser la charge financière et de fixer des échéances précises de réalisation. Ainsi la première étape, de décembre 1999 à juin 2001, portait sur la construction de 42,4 km de site propre et 61 stations, pour un investissement de 217 millions de dollars (Hidalgo, 2003). Le coût moyen par kilomètre de 5,5 millions de Dollars est donc extrêmement réduit pour un Système de Transport Rapide de Masse. La seconde phase de construction s'est achevée en Mai 2006 avec l'ouverture du corridor Suba.

Carte 10 : Les phases de construction du TransMilenio



Source : Bello, 2006

3) L'infrastructure TransMilenio

Le TransMilenio se définit comme un Système de Transport Rapide de Masse urbain utilisant une technologie simple et accessible aux villes pauvres : des bus articulés de haute capacité[77] circulant en site propre sur des corridors. Ces corridors réservés aux bus TransMilenio se situent généralement au centre des artères principales et sont donc séparés du reste de la circulation. Ce système fermé permet ainsi aux autobus articulés de circuler sans obstacle et avec une très haute fréquence de passage. Les axes du TransMilenio fonctionnent en 2x2 voies –sauf dans quelques rares rues trop étroites. Cela permet deux types de desserte : des « lignes express », s'arrêtant seulement à certaines stations, et des « lignes courantes », s'arrêtant à chaque station. A ces corridors s'intègrent un ensemble de lignes de bus d'alimentation couvrant les périphéries du système avec des bus de capacité moyenne. Ces lignes d'alimentation, desservies par de grand bus[78] non-articulés, permettent d'étendre le périmètre urbain couvert par le système. Les stations surélevées, implantées dans l'axe centrale de la voie et espacées de 500 mètres maximum, sont accessibles par des passerelles et présentent des portes automatiques coordonnées avec celles des bus. La billetterie est située à l'entrée des stations. Certaines stations permettent le transfert des voyageurs en provenance ou vers des lignes d'alimentation du système. Un système de contrôle satellitaire suit en permanence les bus ce qui permet de gérer en temps réel l'équilibre entre l'offre et la demande de bus. Un tarif unique permet aux usagers d'accéder aux différentes lignes des bus articulés et d'alimentation.

Photo 16 : Infrastructures TransMilenio vues depuis une passerelle reliant le trottoir de l'avenue à la station BRT.



Source : auteur.

[77] Capacité de 160 passagers ; 18 mètres de long ; 2, 60 mètres de large : quatre porte de 1,20 mètre de chaque coté.

[78] Capacité de 80 passagers

Photo 17 : Station TransMilenio (vue intérieure)



Photo 18 : Station TransMilenio (vue extérieure)



Photo 19 : Bus articulé

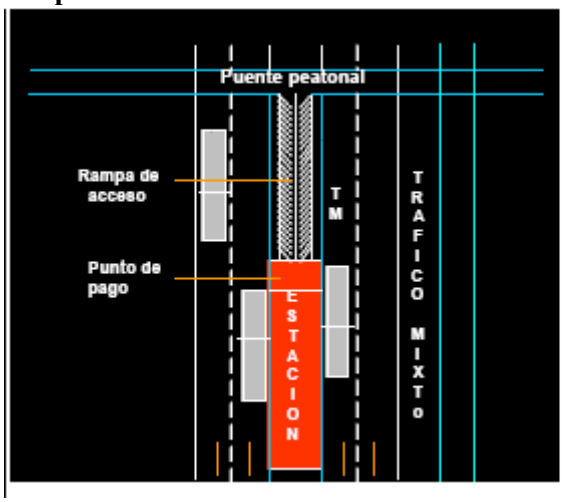


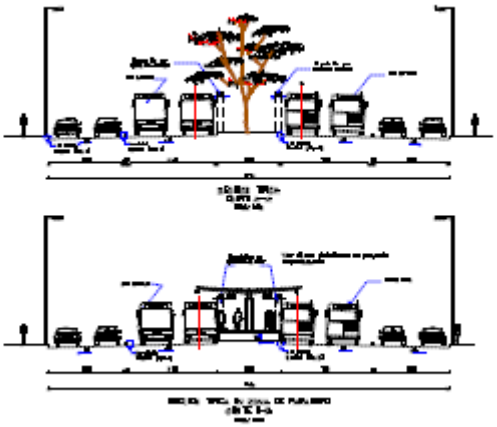
Photo 20 : Bus d'alimentation



Source : Hidalgo, 2003

Graphe 33 : Insertion centrale des corridors BRT à la voirie





Source : Hidalgo, 2003

4) Un Partenariat Public-Privé revisité

Le TransMilenio constitue un nouveau schéma de Partenariat Public–Privé (PPP) pour le service de transport urbain à Bogota, depuis sa conception et sa planification – ce qui a permis de réformer l'organisation institutionnelle inefficace du PPP décrit précédemment – jusqu'à son opération.

En effet les partenaires privés ont été intégrés dès le design du projet. Il s'agit d'une part des grands cabinets de conseil internationaux[79] qui ont travaillé en étroite relation – dans les mêmes bureaux – avec l'équipe de planificateurs et d'autre part des compagnies et propriétaires de bus sans qui rien n'aurait pu être possible. Le cahier des charges de tous n'était pas de déterminer «le meilleur système de transport pour Bogota»[80] mais de définir et appliquer les stratégies pour le réaliser (Ardila, 2004). Parmi les tâches nécessaires pour mener à bien le projet, la plus critique était de négocier avec les opérateurs de bus traditionnels, de les convaincre d'investir dans le nouveau système et de trouver une voie de financement pour les compagnies et propriétaires sous-capitalisés. L'administration de Penalosa a relevé le défi de sortir de l'impasse institutionnelle en 26 mois.

Rapidement s'imposa l'idée que les compagnies et propriétaires de bus devaient être les concessionnaires du TransMilenio : d'une part ces derniers avaient des liens forts avec les pouvoirs politiques et étaient capables de déclencher des grèves et des manifestations[81], d'autre part ne pas les inclure tout en condamnant leur activité aurait un coût social trop important. Mais beaucoup d'éléments du projet inquiétaient les compagnies et propriétaires de bus : le renouvellement de la flotte et la peur que seule la municipalité ou une entreprise étrangère soit en mesure d'acheter les nouveaux bus, la centralisation de la billetterie.

Une interaction permanente entre l'équipe en charge du projet et les opérateurs réussit à convaincre ces derniers que des marges de manœuvres dans la conception du TransMilenio leur étaient laissées et que la municipalité allait respecter ses engagements. Ainsi plusieurs conditions furent introduites dans les appels d'offres afin de garantir leur participation : il fut interdit à l'entreprise publique d'opérer directement et aux entreprises étrangères intéressées de ne pas associer des opérateurs locaux, de plus les concessionnaires devaient racheter 2,7 anciens bus pour chaque bus articulés circulant sur l'infrastructure TransMilenio, enfin l'administration, Mc Kenzie (cf note de bas de page n°79) et le maire firent pression pour que les banques nationales octroient des prêts aux futurs concessionnaires (Ardila, 2004).

Le fonctionnement de TransMilenio est basé sur une alliance Public-Privé à tous les niveaux du système. L'entreprise publique TransMilenio S.A. est en charge de la planification, la construction de l'infrastructure, la coordination et le contrôle du service ; elle reçoit 3% des revenus collectés. L'achat, l'opération des bus et la contractualisation des conducteurs sont à la charge des entreprises privées concessionnaires qui reçoivent 66,5% des revenus dans le cas des opérateurs des corridors et 20% dans le cas des lignes d'alimentation. Une entreprise et une banque sont responsables de la billetterie ; elles reçoivent 10% des revenus. Les 0,5% restants reviennent à une agence de gestion des dépôts.

L'infrastructure TransMilenio fut financée par l'état central et la municipalité. L'état central a financé 39,5 millions de dollars US en 2000, 30,6 millions en 2001, 50 millions annuels entre 2001 et 2005 et s'est engagé à fournir annuellement 100 millions entre 2006 et 2015, puis un dernier versement de 25,5 millions en 2016. Cet apport équivalent à 1295,6 millions de dollars US représente 66% de l'investissement total dans le système (de 2000 à 2016). Pour sa part la municipalité se charge d'apporter entre 2000 et 2016 une somme équivalente à 35 millions de dollars US, soit un total de 674 millions de dollars US. Ce financement provient principalement de la surtaxe sur les carburants (+46%).

Ainsi la puissance publique supporte 51% des investissements totaux et reçoit 3% des bénéfices alors que les opérateurs privés apportent 49% des investissements totaux et perçoit 97% des gains (Hidalgo, 2003). La différence entre les investissements et les bénéfices du secteur public et privé s'explique par l'objectif de recouvrement des coûts d'opération pour le secteur privé – garantie de la durabilité du système – et l'importance des investissements nécessaires à la construction de l'infrastructure, et notamment le coût foncier qui peut représenter jusqu'à 22% de l'investissement

[79] Steer Davis Gleave a travaillé sur la planification, Mc Kenzie sur le financement, Capital Corp. sur les aspects juridiques, et Duran Acero Osario sur l'urbanisme et l'architecture.

[80] La technologie Bus Rapid Transit était déjà choisie.

[81] En 1995, la municipalité de Quito (Equateur) avait dû faire appel aux tanks de l'armée pour disperser une manifestation contre l'ouverture de son trolley-bus public.

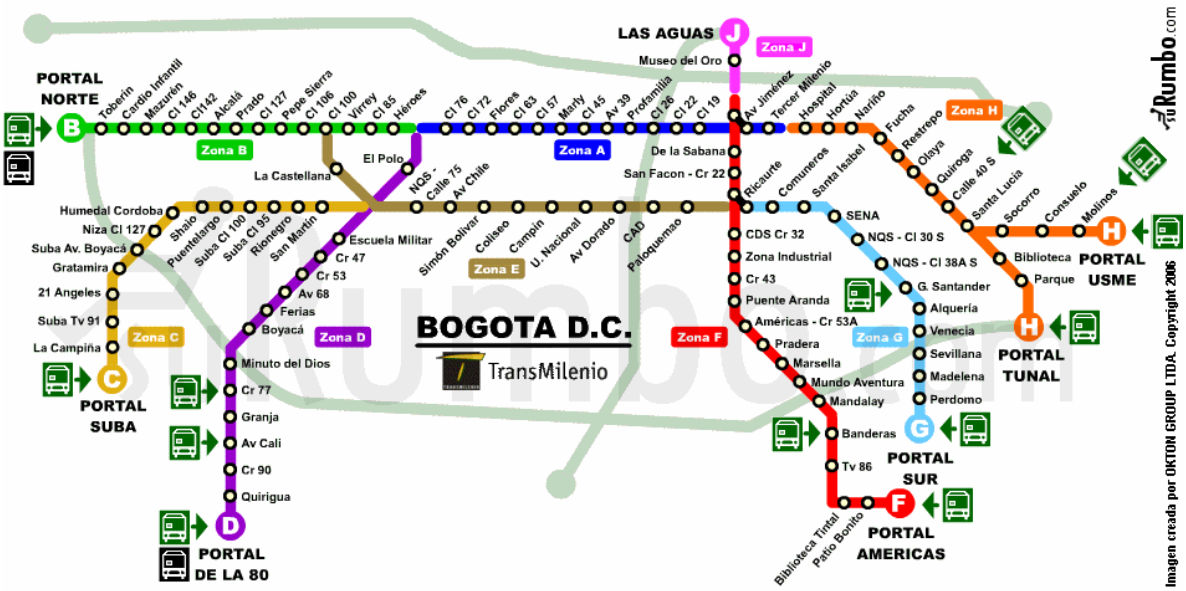
total[82]. Ceci est en grande partie dû à la valorisation des sols liée au TransMilenio. Pour la troisième phase (2006 – 2011), il est envisagé de mettre en place des mécanismes de récupération de la plus-value foncière et immobilière.

5) Les résultats

Si la technologie est simple, les résultats sont impressionnants : la première phase du TransMilenio a été conçue et mis en œuvre en moins de 26 mois. Le tarif est de 0,36USD par voyage ce qui est abordable pour l'ensemble de la population et permet de couvrir tous les coûts de fonctionnement (Hidalgo, 2002). Fin 2002, après à peine deux années de fonctionnement, TransMilenio[83] transportait 780.000 passagers par jour, la durée moyenne des déplacements avait diminué de 32%, la pollution de certains composants[84] avait été réduite de 40%, les accidents routiers mortels avaient chuté de 94% (Ardila, 2004).

Fin 2006, les deux premières phases de construction achevées, le site propre s'étend sur 84 km et possède 114 stations. 857 bus articulés y circulent. La fréquentation quotidienne est de l'ordre de 1,3 million de passagers (TransMilenio S.A.). Le réseau de rabattement, long de 477 km, comprend 57 lignes sur lesquelles circulent 430 bus neufs (TransMilenio S. A.).

Carte 11 : Plan des lignes du TransMilenio - 2006



Source : TransMilenio S. A.

Baptisé « métro de surface », le TransMilenio combine l'efficacité et la qualité de service d'un système de transport sur rail et des coûts de construction et de fonctionnement significativement moindres.

Le TransMilenio constitue un changement radical de modèle organisationnel pour la fourniture du service de transport public. La mise en route du projet TransMilenio a nécessité l'élimination de l'excessive compétition entre les bus privés, le remplacement progressif d'un système de transport en concession tout en intégrant les acteurs traditionnels dans le nouveau service de transport, la création d'un nouveau cadre de régulation et l'adoption d'une nouvelle technologie – des bus articulés en site propre.

[82] En moyenne, le foncier représente 12,5% de l'investissement total.

[83] avec 58Km de corridors et 309Km de lignes d'alimentation, soit 25% du projet global.

[84] concentration de PM10

A la différence des autoroutes urbaines et métros qui nécessitent des subventions, le TransMilenio de Bogota non seulement requiert des investissements moindres mais en plus génère des profits. Quand la solution du rail est choisie dans des villes pauvres, les capacités financières limitées ne permettent que de construire quelques lignes qui desservent rarement plus de 15% des déplacements quotidiens (Hidalgo, 2003). Le programme du TransMilenio est de construire 22 lignes d'ici 2016, ce qui permettrait à 85% des citadins de vivre à moins de 500 mètres d'une station. L'accès à la ville, à ses emplois et services serait enfin partagé entre riches et pauvres.

C - *Conclusions*

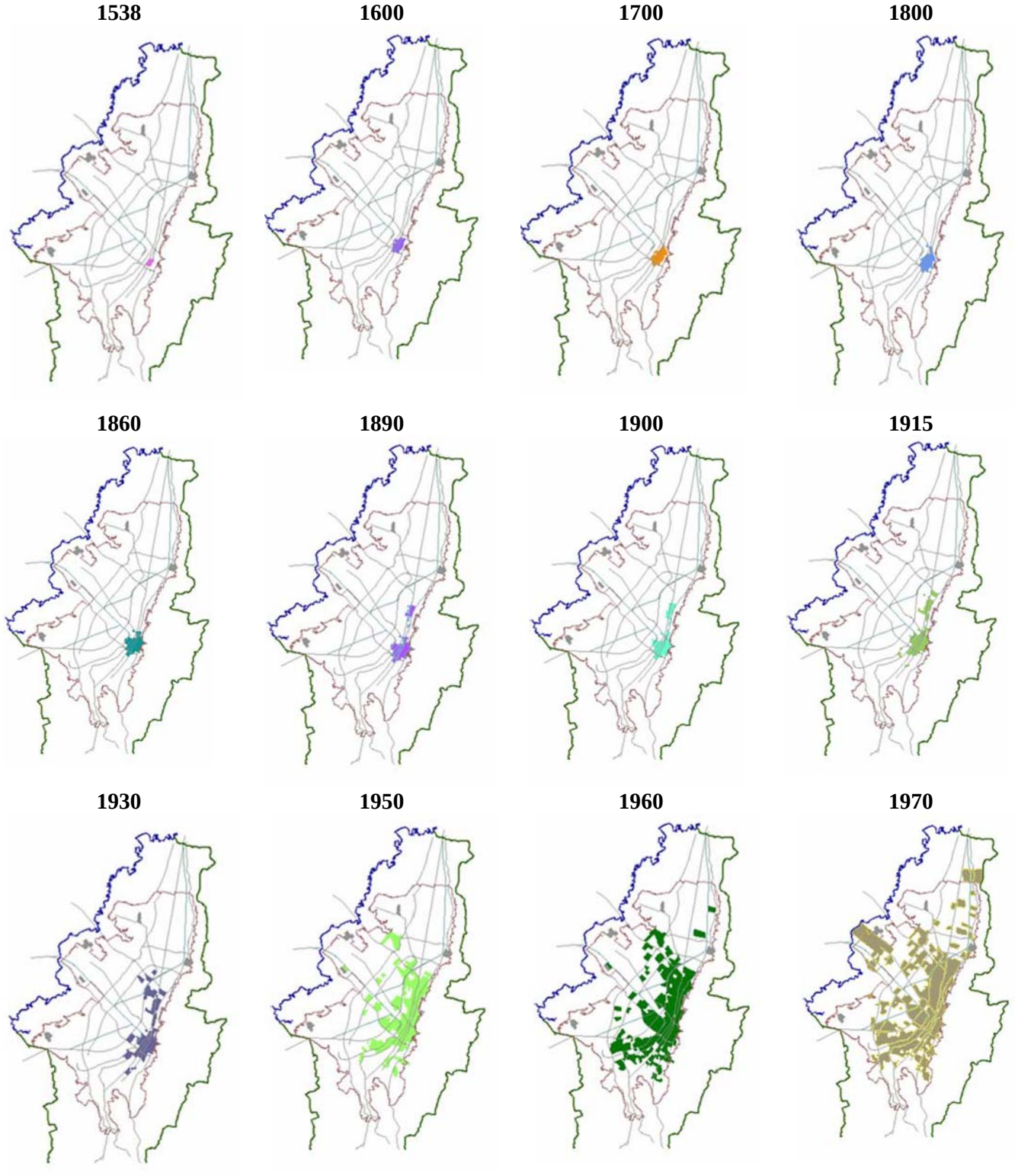
Les différentes analyses menées dans les années 1990 convergent sur le constat que les problèmes de congestion de la fin du 20ème siècle n'étaient pas liés à un déficit infrastructurel. La voirie était suffisante pour supporter le volume de véhicules circulant dans l'agglomération. **La congestion à Bogota à la fin de la période 1970 – 2000 s'explique alors par des causes structurelles et institutionnelles** : une faiblesse institutionnelle engendrant un manque de ressources financières, une faible capacité de planification, gestion et contrôle du réseau de voierie et du service de bus collectif ; la concentration au Nord des propriétaires de véhicules et une structure urbaine engendrant une matrice des déplacements où à des origines dispersées correspondaient des destinations concentrées sur le centre ville et l'axe nord-sud principal, l'avenue Caracas ; et enfin une organisation radio-centrique des axes routiers principaux et des lignes de bus, les rocades périphériques étant sous-utilisés.

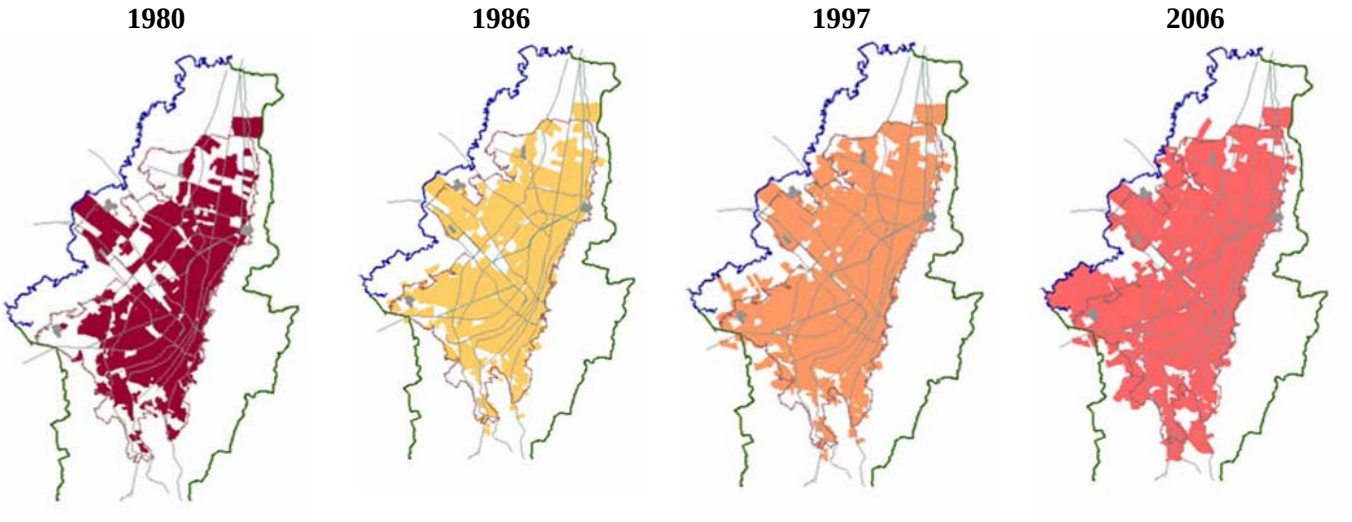
Pourtant les réponses envisagées et mises en oeuvre par les autorités publiques se caractérisent par une approche limitée à la construction d'infrastructure de transport : les multiples projets de métro lourd, la troncal de l'avenue Caracas puis le système Bus Rapid Transit TransMilenio.

Durant toute la période 1970 – 2000, la décision politique pour répondre aux problèmes croissants de mobilité fut biaisée par le débat entre deux technologies de transport massives : le métro et le bus en site propre. La troncal de l'avenue Caracas se devait de constituer une alternative valide au métro. Si cette expérience se solda sur un constat d'échec, elle permit néanmoins de montrer que la technologie du bus en site propre était en mesure de concurrencer le métro pour améliorer la vitesse du trafic. D'autre part, elle mit en évidence que mettre en place un BRT comme celui de Curitiba - le modèle - était bien plus que de simplement construire des voies réservées pour les bus. Renforcer les capacités des agences en charge de planifier, gérer et maintenir les infrastructures de transport et établir un partenariat public-privé vertueux constituent les points critiques. C'est sur ces deux problèmes que Penalosa, maire-architecte du TransMilenio, concentra avec succès ses efforts.

Ainsi **le TransMilenio peut être analysé comme une solution technologique à un problème institutionnel**. Il s'intègre dans une « politique urbaine par grand projet » permettant de fédérer les acteurs locaux et de faire levier pour mener les réformes institutionnelles nécessaires.

Carte 12 : Evolution de la forme urbaine de Bogota. 1538 – 2000.





Source : Bello, 2006

VI - Conclusions

Ce troisième chapitre a analysé d'une part les relations fonctionnelles entre le système de transport et le système d'usage des sols définissant le couple « transport – usages des sols et d'autre part leurs effets sur les processus de structuration urbaine.

Nous démontrons, sur un exemple urbain concret (Bogota, Colombie), comment au cours de l'histoire longue les différentes dynamiques d'expansion et de structuration de l'espace urbain furent engendrées par l'évolution des systèmes de transport successifs, et réciproquement comment ces dynamiques urbaines ont au cours du temps favorisé tel ou tel mode de transport.

Nous montrons ainsi qu'il n'y a pas d'effet structurant prédominant dans le processus de structuration urbaine, ni de la part des infrastructures de transport (hypothèse développée dans les travaux de Schaeffer et Barter), ni de la part des politiques publiques (hypothèse développée par Bertaud). Nous prouvons qu'il est plus pertinent d'analyser l'évolution de la structure urbaine comme le produit d'une co-détermination et d'une interdépendance entre le système de transport et le système d'usage des sols. L'évolution d'un des deux systèmes est déterminée par l'évolution de l'autre, et réciproquement. Il s'agit donc de considérer le couple « transport – usage des sols » dans son ensemble.

L'analyse des évolutions historiques de la structure urbaine de Bogota confirme le caractère central des interactions entre le système de transport et le système d'usage des sols dans les dynamiques urbaines. Le couple « transport – usage des sols » est au cœur des processus de structuration de l'espace urbain. C'est donc bien sur ce couple qu'il faut intervenir pour infléchir les trajectoires des consommations énergétiques liées aux transports.

Nous mettons en exergue que, pour chaque période historique, un équilibre s'établit progressivement entre la distribution spatiale des résidences et des activités, générant une demande de mobilité, et le système de transport, caractérisant une offre de mobilité. La situation de la mobilité, l'activité de production foncière et immobilière, la planification urbaine et la politique d'investissement dans les infrastructures de transport sont interdépendantes et co-déterminées. Cet équilibre se traduit d'une part dans une matrice Origine-Destination et une répartition modale des

déplacements réalisés – et donc dans les consommations énergétiques liées aux transports urbains - et d'autre part dans la distribution spatiale des prix fonciers et immobiliers. C'est la perturbation de cet équilibre provoquée par la construction du TransMilenio qui nous intéressera dans le chapitre 4.

Nous montrons d'autre part que les décisions de localisation des investissements résidentiels et d'activités et les prix fonciers et immobiliers sont de même interdépendants et co-déterminés. Les dynamiques des marchés fonciers et immobiliers sont alors à la fois le reflet et des causes du processus de structuration urbaine.

Cette interdépendance et cette co-détermination entre la planification urbaine, la promotion foncière et immobilière, l'hétérogénéité de l'accessibilité, la distribution spatiale des prix fonciers et immobiliers sont à relier avec les relations entre les deux principes économiques à la base de l'organisation interne de l'espace urbain : le principe d'accessibilité qui gouverne les choix de localisation et qui donne lieu par effets cumulatifs à la structuration de l'espace ; le principe d'interaction des activités dans l'espace qui induit la demande de transport. Riches des analyses empiriques menées dans la deuxième partie, nous étudierons ces deux principes économiques et leurs relations dans le chapitre 5 de la troisième partie.

Enfin nous retenons des analyses menées dans ce chapitre que ces relations fonctionnelles au sein du couple « transport –usages des sols » se construisent dans un cadre défini par un ensemble de paramètres :

Tout d'abord la géographie physique du site urbain influence la facilité et la façon selon laquelle de nouvelles zones peuvent être urbanisées, mais aussi les préférences de localisation des différentes fonctions urbaines et classes sociales.

Ensuite les héritages du passé conditionnent les développements urbains futurs. La forme et la structure urbaine d'une ville évoluent sur le long terme mais chaque nouvelle dynamique urbaine hérite d'une organisation spatiale et d'infrastructures avec lesquelles les acteurs urbains doivent composer. Nous pouvons notamment citer la forme urbaine - linéaire puis atomisée dans l'historie de Bogota -, les axes de communication, la localisation des fonctions productives comme les secteurs utilitaires ou les industries, l'organisation en quartier, la ségrégation sociale et fonctionnelle, l'érosion ou la (re-)valorisation du centre ville etc. Certains auteurs comparent alors l'histoire urbaine avec un processus de sédimentation par phases successives.

Les politiques menées au niveau national ont des effets décisifs, notamment sur les évolutions de la planification urbaine et le dynamisme du secteur de la production foncière et immobilière. Pour exemples, nous pouvons citer dans le cas de Bogota les effets de la stratégie des « secteurs leaders » développée par le président Pastrana à partir de 1970 (développement intensif de la promotion immobilière) ou de l'ouverture économique au début des années 1990 (explosion du taux de motorisation). De même le pouvoir et les ressources humaines et financières dont disposent les administrations en charge du couple « transport – usage des sols » dépendent en partie d'une organisation institutionnelle et législative décidée au niveau national.

Enfin les caractéristiques culturelles et historiques nationales participent à définir le cadre au sein duquel s'établissent les relations fonctionnelles du couple « transport –usages des sols ». Les convergences d'intérêt ou d'opinion et les aspirations des élites urbaines locales sont ainsi déterminantes dans le jugement porté sur une situation urbaine et l'élaboration des politiques urbaines, et notamment dans les décisions d'investir dans la construction d'une infrastructure de transport. Le contexte national d'industrialisation mais aussi de guerre civile[85] dans le cas de la Colombie détermine les migrations vers la ville et donc en partie les taux de croissance démographique.

Nous avons montré dans la dernière section de ce chapitre 3 que la dégradation de la mobilité à la fin du 20ème siècle s'explique par la structure urbaine et par des déficiences institutionnelles. Le BRT TransMilenio est un succès puisqu'il a considérablement amélioré la situation de congestion et de saturation du système de transport. Il a de même permis de fédérer les acteurs locaux et de faire levier pour mener les réformes institutionnelles nécessaires. Il peut alors être analysé comme une

[85] El Tiempo estimait en Janvier 2006 que 20 familles arrivaient quotidiennement à Bogota du fait de la violence (El Tiempo, 16 Janvier 2006).

solution technologique à un problème institutionnel. Mais que penser de ses effets de long terme sur la structuration urbaine ? Nous analysons dans le chapitre 4 les effets tendanciels - observables cinq années après le début des opérations - du TransMilenio sur la structure urbaine.

Chapitre 4 : Analyse des effets d'une infrastructure de Transport Rapide de Masse (le B.R.T. TransMilenio) sur la structure urbaine

Ce quatrième chapitre a pour objectif d'analyser les effets de l'introduction d'une infrastructure de transport sur les systèmes d'usage des sols et de transport définissant le couple « transport – usage des sols » et leurs conséquences sur les dynamiques de structuration urbaine.

Nous tirons de cette analyse des enseignements sur les relations fonctionnelles au sein du couple « transport – usage des sols » et leurs effets structurants sur la structure urbaine.

Nous travaillons sur un exemple concret, le système de « *Bus Rapid Transit* » (BRT) TransMilenio introduit à Bogota (Colombie) au début du 21ème siècle. Ce chapitre s'appuie sur une revue critique de la littérature et sur des analyses quantitatives que nous avons développées à partir d'une base de données recueillie à Bogota auprès de la Lonja de Propriedad Raiz de Bogota (LPRB).

La première section étudie les réactions des marchés fonciers et immobiliers à l'introduction d'une infrastructure de Transport Rapide de Masse. Cette section quantifie et qualifie les effets du TransMilenio sur les prix fonciers et immobiliers par une approche comparative menée à partir d'une base de données sur les prix fonciers.

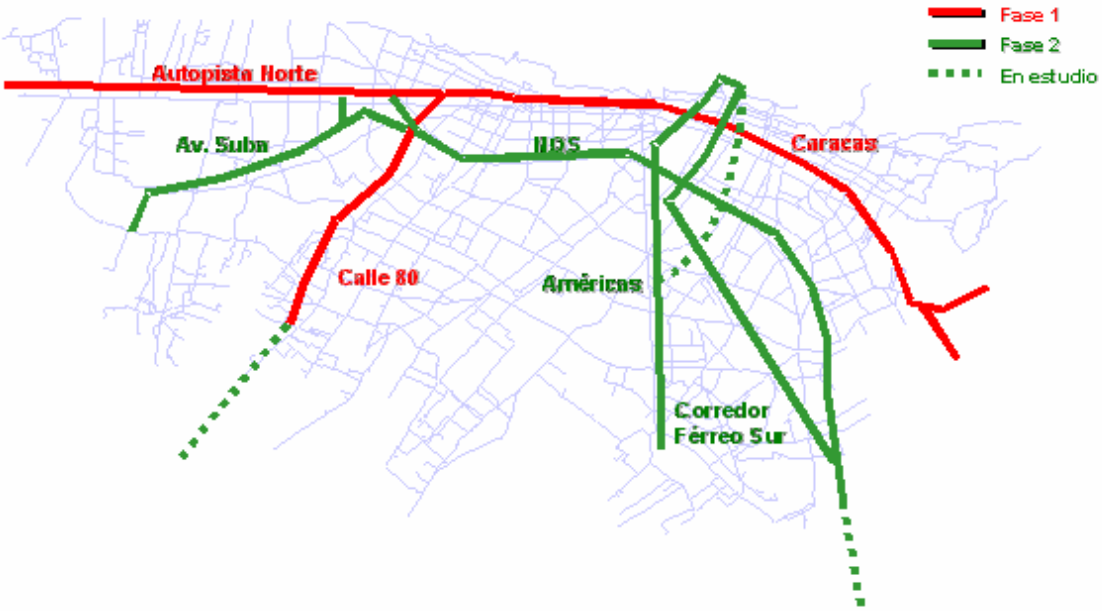
La deuxième section analyse un premier aspect de l'évolution des dynamiques d'occupation de l'espace urbain liée à l'introduction du BRT : l'intensité de l'usage des sols le long des corridors.

La troisième section étudie un second aspect des effets du BRT sur les dynamiques d'occupation de l'espace urbain : les évolutions de l'usage des sols le long des corridors BRT.

La quatrième section examine les effets du BRT sur les périphéries de l'agglomération.

Enfin dans la cinquième section nous analysons les effets du BRT sur la mobilité urbaine. Nous confrontons les matrices Origines – Destinations de 1996 et 2006 afin d'examiner les évolutions liées à l'introduction du TransMilenio du nombre, des modes, des distances, des durées et des couples origine – destination des déplacements réalisés par les habitants de Bogota.

Carte 13 : Les corridors du BRT TransMilenio de la première et deuxième phase



Source : Rodriguez 2006

I - Analyse des effets du TransMilenio sur les prix fonciers et immobiliers

Nous analysons dans cette section les effets du TransMilenio sur les prix fonciers et immobiliers. Notre objectif est d'identifier, de quantifier et de qualifier au travers de l'analyse des prix les réactions des marchés foncier et immobiliers à la construction d'une infrastructure de Transport Rapide de Masse, le BRT TransMilenio.

Nous n'avons pas cherché à élaborer un modèle de prix hédonique[86] pour cela, du fait des critiques – discutées dans la sous-section I.B. - que les évaluations économétriques des prix hédoniques immobiliers et fonciers suscitent habituellement mais surtout faute de données complètes et pertinentes. Aussi nous limitons notre analyse quantitative à une approche comparative à partir d'une base de données que nous avons recueillie auprès de la Lonja de Propriedad Raiz de Bogota (LPRB).

Dans un premier temps, nous reprenons les travaux de Jaramillo (Jaramillo, 2004) sur l'évolution des prix fonciers et immobiliers moyens pour Bogota afin de situer nos analyses des dynamiques foncières et immobilières des zones affectées par le TransMilenio dans le contexte plus global de l'agglomération.

Ensuite nous discutons les résultats de deux études (Barrios, 2002 ; Targa, 2003) sur les variations des loyers le long des corridors BRT.

Puis nous comparons, à partir des données recueillies à la LPRB, l'évolution des prix fonciers des zones affectées par le TransMilenio à celle de l'ensemble de l'agglomération, les variations des prix fonciers entre zones affectées puis par rapport à des zones similaires mais non-affectées par le BRT.

[86] L'analyse de prix hédonique relie le prix d'un bien à ces différentes caractéristiques.

Enfin nous différencions, à partir des données recueillies à la LPRB et d'autres sources d'information, les effets du TransMilenio sur les prix fonciers des zones affectées selon trois paramètres : le niveau socio-économique des populations résidentes ou *estrato*[87], l'usage dominant des sols et le degré de consolidation.

A - *Contexte général : évolution des prix fonciers et immobiliers pour l'ensemble de l'agglomération sur la « période TransMilenio »*

Nous nommons **« période TransMilenio »** la période allant de la prise de décision par le maire Penalosa de construire le BRT TransMilenio jusqu'à 2006. Cette « période TransMilenio » se divise en trois phases : la phase de programmation du TransMilenio (1999), la phase de construction des corridors BRT (Décembre 1999 – Décembre 2001) et la phase d'opération du Système de Transport Rapide de Masse débutant en Janvier 2002.

A partir des statistiques du Département Administratif National de Statistique (DANE) sur les prix de l'immobilier ancien et neuf, du recueil de l'évolution des loyers publiés dans les journaux effectué par le CEDE de l'université des Andes et des informations sur les prix du foncier produites chaque année par la Lonja de Propriedad Raiz de Bogota (LPRB), Jaramillo (Jaramillo, 2004) analyse les différents marchés immobiliers (location, achat-vente ancien et neuf) et foncier sur la période 2000-2004.

Il observe que **les prix sur les trois marchés immobiliers et le marché foncier ont des taux de croissance négatifs jusqu'au premier semestre 2002.** Durant le second semestre 2002, les loyers et les prix d'achat-vente de l'immobilier neuf montrent des taux de croissance positifs alors que les prix foncier et les prix de l'immobilier neuf sont toujours à la baisse. **Tous les prix connaissent des taux de croissance positifs dès 2003.**

Tableau 36 : Taux de croissance annuelle des loyers et des prix fonciers et immobiliers. 2000 - 2004

TASAS DE CRECIMIENTO REAL ANUAL DE PRECIOS INMOBILIARIOS				
PROMEDIO				
	Alquileres CEDE	Precios Viv. Usada	Precios Viv Nueva	Precios Tierra
2000-2	-3,97	-9,33	-9,55	-8,33
2001-1	3,85	-5,59	-2,41	
2001-2	-5,68	-4,49	-4,01	-7,68
2002-1	-0,53	-3,27	-5,80	
2002-2	4,93	8,87	-1,15	-1,51
2003-1	4,61	6,38	4,67	
2003-2	11,83	-3,13	1,49	7,82
2004-1	15,76	10,28		

Source : Jaramillo, 2004

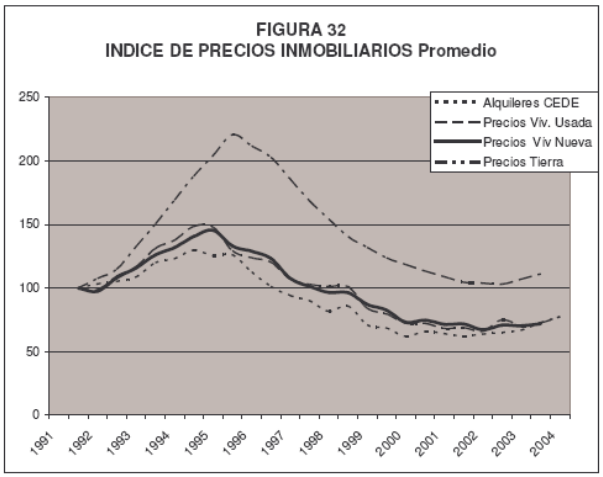
Jaramillo considère que **les marchés immobiliers et fonciers sont repartis dans une phase ascendante à partir de 2003**.

Toutefois pour avoir une vision proportionnée de cette récupération, Jaramillo (Jaramillo, 2004) la replace dans le contexte cyclique de l'évolution des prix immobiliers et fonciers au tournant du

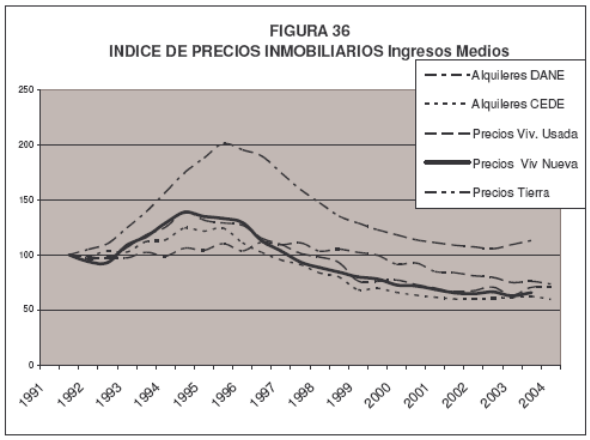
[87] En Colombie, les autorités utilisent une stratification socio-économique (« *estrato* ») des quartiers en fonction du niveau de revenu de la population majoritaire y résidant : l'*estrato* 6 correspond aux classes très aisées, l'*estrato* 1 aux populations très pauvres. Nous reprenons le terme de *estrato* dans ce chapitre.

siècle. Nous avions observé dans le chapitre 3 (section IV.C.) un cycle particulièrement accentué sur la période 1991-2000, avec une phase de forte valorisation en 1991 et 1995, un pic de croissance en 1993 avec un taux de croissance annuelle proche de 35%, et une phase de dévalorisation ensuite. Jaramillo observe que malgré cette récupération, **les prix d'achat-vente et les loyers en 2004 ne représentent que 77% du niveau le plus bas du début de cycle (1991) et autour de 60% du niveau le plus haut. Au premier semestre 2004, seuls les prix fonciers restent supérieurs au niveau qu'ils connaissaient au début du cycle (1991)**.

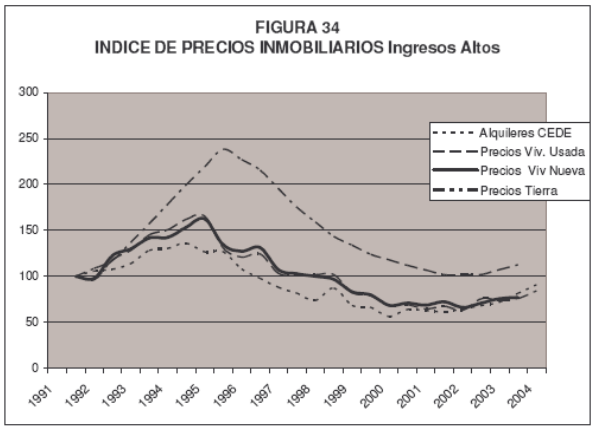
Graphe 34 : Evolutions relatives à 1991 des loyers, prix immobiliers et fonciers moyens



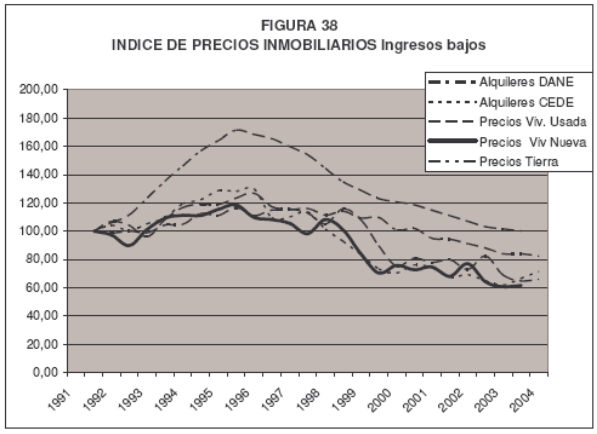
Graphe 35 : Evolutions relatives à 1991 des loyers, prix immobiliers et fonciers des quartiers classes moyennes



Graphe 36 : Evolutions relatives à 1991 des loyers, prix immobiliers et fonciers des quartiers aisés



Graphe 37 : Evolutions relatives à 1991 des loyers, prix immobiliers et fonciers des quartiers pauvres



Source : Jaramillo, 2004

La comparaison entre les quartiers de standing différent montre que **la récupération des différents prix est plus rapide et plus prononcée dans les quartiers aisés**. Jaramillo (Jaramillo, 2004) observe en effet une remontée des taux de croissance dès le second trimestre 2002 dans les quartiers aisés, alors que dans les quartiers de classes moyennes il faut attendre le second semestre 2003 pour voir des taux positifs, et seulement pour certains prix. Enfin la reprise des prix dans les quartiers pauvres est presque insignifiante et plus tardive.

B - *Effets du TransMilenio sur les loyers le long des corridors BRT*

Il existe dans la littérature deux études de prix hédoniques qui, à partir des données obtenues sur un échantillon significatif, proposent une généralisation de l'effet du TransMilenio sur le marché locatif.

La première fut réalisée en 2002 par Barrios (Barrios, 2002) à partir d'une enquête sur les préférences déclarées (384 enquêtes téléphoniques) et d'une autre sur les préférences révélées (490 observations des loyers) sur des franges de 1,5 km autour des corridors de l'Avenue Caracas[88] et de la Calle 80[89] (cf. carte 13). Les zones sélectionnées incluent des quartiers des différents *estratos*.

L'étude se base sur un modèle de prix hédoniques et montre que la distance entre le logement et la station de TransMilenio la plus proche (distance viaire) – utilisée comme indicateur d'accessibilité – influe significativement les loyers mensuels : pour une diminution de 1% de la distance viaire, le loyer augmente de 0,0421%.

D'autre part cette étude montre qu'en plus d'une amélioration de l'accessibilité, le TransMilenio a des effets sur d'autres paramètres de la qualité de vie qui ont des conséquences significatives sur les loyers. Ainsi Barrios (Barrios, 2002) observe que, pour une diminution de 1% de la pollution auditive et de l'air (liée à la disparition des lignes de bus traditionnels), les loyers augmentent respectivement de 0,02% et 0,03%. L'amélioration (1%) de la sécurité (liée à la présence de l'armée autour des stations) augmente de 0,06% les loyers.

La deuxième étude fut réalisée par Targa (Targa, 2003) en 2002 à partir d'un échantillon de 494 loyers – nouvellement mis en location - observés dans une frange de 1,5 km autour des corridors TransMilenio de l'Avenue Caracas et de la Calle 80.

A l'instar de Barrios (Barrios, 2002), Targa (Targa, 2003) utilise un modèle de prix hédoniques. Targa montre que le loyer mensuel diminue de 3,71% tous les 100 mètres supplémentaires d'une station du BRT, toutes choses égales par ailleurs.

Ces deux études de prix hédoniques confirment l'effet positif significatif de la proximité au TransMilenio et donc de l'accessibilité à la ville sur le marché locatif, et par là sur les marchés immobilier et foncier.

En effet nous avons conclu de l'analyse des dynamiques de long terme des marchés immobiliers et foncier développée dans le chapitre 3 que

- les prix d'achat-vente de l'immobilier ancien et neuf sont fortement reliés, les oscillations sont similaires aussi bien en amplitude que en temporalité ;
- les séries temporelles des loyers et des prix d'achat-vente de l'immobilier ancien suivent les mêmes oscillations, ce qui signifie que les deux marchés du logement existant (ou les deux formes de circulation des logements existants) ont une connexion étroite ;
- tout en conservant des oscillations similaires, les séries temporelles des loyers et des prix d'achat-vente de l'immobilier ancien connaissent une progressive divergence : au fur et à mesure, les loyers représentent une proportion moindre des prix d'achat-vente.

Ainsi, si le TransMilenio a un effet positif sur les loyers le long des corridors BRT, il est fort probable que cette appréciation se répercute sur les prix de l'immobilier ancien et neuf, et cela proportionnellement plus.

Ensuite la divergence sur le long terme entre les marchés de l'immobilier (à la baisse) et le marché du foncier (à la hausse) ainsi que les principes du « cliquet à la baisse » et du « multiplicateur

[88] La frange sélectionnée le long du corridor de la Caracas s'étend depuis l'Avenue Primera jusqu'à la Carrera 30 et depuis la Calle 40 jusqu'à la Calle 80 Nord.

[89] La frange sélectionnée le long du corridor de la Calle 80 s'étend depuis l'Avenue Primera jusqu'à la Carrera 69 et entre la Calle 60 et la Calle 96.

foncier » (Renard, 2003) présentés dans la section IV.C.4. du chapitre 3 permettent de supposer que cette appréciation observée sur les loyers se répercute positivement sur les prix fonciers.

Cependant il nous semble que les résultats des études de Barrios (Barrios, 2002) et Targa (Targa, 2003) doivent être nuancés par trois remarques.

La première remarque relève des critiques courantes des travaux d'économétrie, notamment sur des biens complexes comme les biens immobiliers. En effet, l'évaluation des attributs conduisant à la formation du prix d'un bien immobilier révèle des phénomènes de colinéarité et d'auto-corrélation entre les variables analysées. Ensuite la limite de l'agrégation des informations – l'accessibilité est définie pour chaque zone par rapport à l'ensemble des zones composant l'agglomération et non par rapport à chaque zone en particulier – fait que l'évaluation n'utilise pas l'ensemble de la matrice des déplacements mais seulement un vecteur d'accessibilité globale pour chacune d'entre elle. Enfin les données disponibles limitent nécessairement le nombre d'attribut qu'un travail d'économétrie peut prendre en compte.

La seconde remarque porte sur la nature de l'effet positif du TransMilenio sur les loyers. En effet, la première étude (Barrios, 2002) montre que l'amélioration du cadre de vie (pollution auditive, de l'air et sécurisation) affecte autant si ce n'est plus les loyers que l'accessibilité.

Enfin nous avons montré dans le chapitre 3 que, depuis les années 1930, le développement urbain de Bogota est structuré par les principales artères de la maille viaire. Aussi il est légitime de supposer que les immeubles proches des voies principales ont toujours eu des prix supérieurs. Il serait donc utile de mener une étude comparative le long d'un axe de mobilité importante ne supportant pas de corridor BRT, afin d'isoler les effets réels du TransMilenio.

C - *Comparaison de l'évolution (1999 – 2004) des prix fonciers entre les zones affectées par le TransMilenio et le reste de l'agglomération*

Notre objectif dans cette sous-section est d'identifier, de quantifier et de qualifier les effets du TransMilenio sur les prix fonciers des zones affectées. Nous travaillons à partir d'une base de données recueillie auprès de la Lonja de Propiedad Raiz de Bogota (LPRB).

1) Sélection des zones d'étude

En partenariat avec Maria Isabel Robles Hoyos[90], nous avons recueilli les données de la Lonja de Propiedad Raiz de Bogota (LPRB) sur les prix et usages du foncier de 98 zones représentatives de l'agglomération. La LPRB constitue cette base de données annuellement à partir des transactions et des évaluations effectuées par ces affiliés. Les 98 zones de la LPRB ne couvrent pas l'ensemble de l'agglomération et ne sont généralement pas contiguës.

Des 98 zones observées par la LPRB, seules 11 sont directement en contact avec un corridor TransMilenio construit lors de la première phase ; c'est-à-dire les corridors Calle 80, Autoroute Nord, Avenue Caracas et Eje Ambiental – Avenue Jimenez (cf carte 13). Nous présentons dans l'annexe 6 les caractéristiques de ces 11 zones et nous les situons au sein de l'agglomération de Bogota et par rapport aux corridors du TransMilenio dans la carte de l'annexe 7. Les caractéristiques et les taux de croissance annuelle des 11 zones affectées par le TransMilenio sont présentés dans l'annexe 8.

[90] Nous avons obtenu cette base de données grâce à l'aide de Maria Isabel Robles Hoyos, étudiante en Master à l'université Nacional de Colombia où l'auteur de cette thèse a été accueilli 6 mois en 2006 pour mener ses travaux de terrain sur Bogota. Maria Isabel réalisa son mémoire (Robles, 2006) de Master en Urbanisme sous la direction de F. Montenegro. Elle tenta de construire un modèle de prix hédonique pour analyser les effets du TransMilenio sur les prix fonciers. Faute d'une base de données suffisamment large et complète, cette recherche ne put aboutir. Je profite de cette (trop courte) note pour les remercier tous les deux de leurs accueils et leurs soutiens pendant ces mois passés à Bogota.

2) Comparaison des 11 zones affectées par le TransMilenio avec l'ensemble de l'agglomération

a) Avant la « période TransMilenio »

Le graphe 38 montre que **sur la période 1990-1998, le prix foncier moyen nominal de ces 11 zones connaît une évolution similaire à** celle observée par Jaramillo (Jaramillo, 2004 ; chapitre 3.IV.C) pour le prix foncier moyen sur **l'ensemble de l'agglomération** : forte valorisation jusqu'à 1994 puis diminution du taux de croissance des prix fonciers.

Entre 1990 et 1993, le prix foncier moyen nominal des 11 zones augmente graduellement, selon des taux de croissance annuelle de +35% en 1991, +48% en 1992, +66% en 1993. A partir de 1994, cette tendance à la valorisation s'inverse, le taux de croissance annuelle moyen diminue : +59% en 1994, +38% en 1995, +11% en 1996, +1,3% en 1997, -2,5% en 1998. Ces taux de croissance sont du même ordre de grandeur que ceux observés par Jaramillo (Jaramillo, 2004) pour l'ensemble de la ville (cf. Chapitre 3.IV.C.).

b) Sur la « période TransMilenio ».

Nous comparons ces 11 zones d'étude sélectionnées car directement affectées par le TransMilenio avec l'ensemble des zones observées par la Lonja de Propriedad Raiz de Bogota (LPRB), représentatives de l'agglomération de Bogota (les 98 zones), puis avec les zones en valorisation seulement (affectées ou non par le TransMilenio).

Nous effectuons ces comparaisons pour trois périodes de temps : de 1999 à 2004, c'est-à-dire depuis l'élaboration et l'annonce du projet BRT jusqu'à sa troisième année d'opération ; de 1999 à 2001, c'est-à-dire depuis l'annonce du projet BRT jusqu'à la fin des travaux de construction ; et enfin de 2002 à 2004, c'est-à-dire durant la phase de fonctionnement du TransMilenio.

Tableau 37 : Evolution des prix fonciers de l'agglomération, des zones en valorisation et des zones affectées par le TransMilenio durant la « période TransMilenio »

	1999-2004		1999-2001		2002-2004	
	Nombre de zones	**Evolution %**	**Nombre de zones**	**Evolution %**	**Nombre de zones**	**Evolution %**
Agglomération	98	**3,06 %**	98	**0,80 %**	98	**5,33 %**
Zones en valorisation	80	**4,19 %**	64	**3,10 %**	90	**5,91 %**
Zones affectées par le TransMilenio	11	**5,27 %**	11	**3,75 %**	11	**6,79 %**

Source : Elaboration par l'auteur, à partir des données de la LPRB.

Nous constatons que pour les trois périodes étudiées**, les prix fonciers dans les zones affectées par le TransMilenio augmentent en moyenne significativement plus, non seulement par rapport à l'ensemble de l'agglomération mais aussi par rapport aux zones connaissant une appréciation foncière.**

Durant la phase de programmation et de construction du BRT, cette différence est importante par rapport à l'ensemble de l'agglomération (+2,95%) et plus faible par rapport à l'ensemble des zones en cours de valorisation (+0,65%). **Nous pouvons présumer d'un certain impact négatif des travaux de construction, compensant quelque peu la valorisation liée au projet BRT**. Nous étudierons cela en détail par la suite.

Lors de la phase d'opération du TransMilenio, l'écart de valorisation des 11 zones d'étude reste significatif mais diminue à +1,46% par rapport à celle de l'ensemble de l'agglomération, et augmente à +0,88% par rapport à celle de l'ensemble des zones en valorisation. Cette évolution est liée au cycle globalement à la hausse des prix fonciers.

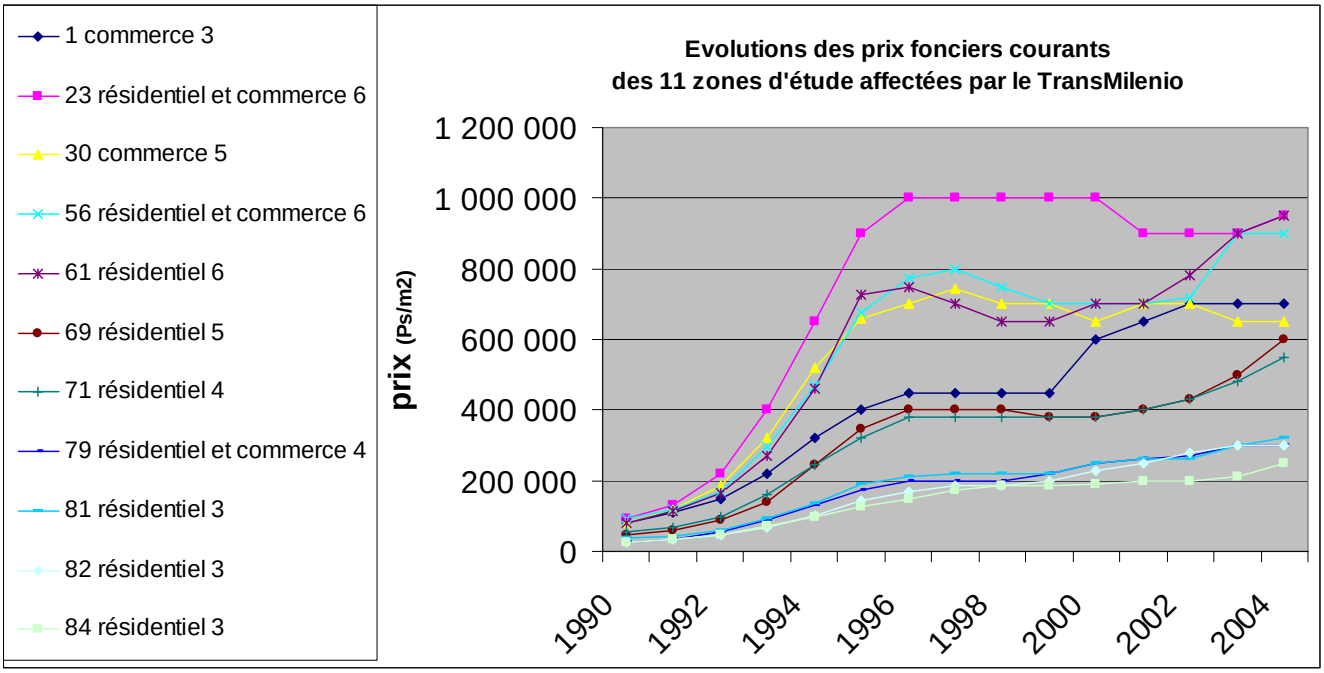
Enfin sur l'ensemble de la période 1999 – 2004, les différences sont significatives puisque sur l'ensemble des 80 zones en valorisation le prix relatif moyen connait une appréciation foncière 1,13% supérieure à celle de la ville dans son ensemble, alors que les 11 zones affectées par le BRT se valorisent +2,21% plus que l'ensemble de l'agglomération, soit +1,08% que l'ensemble des zones en valorisation.

Ces chiffres montrent de manière très générale une t**endance à la valorisation foncière des zones directement affectées par le TransMilenio**. Cette valorisation foncière est **significative aussi bien durant la phase des travaux que lors de la mise en opération du BRT**.

3) Evolution comparée des prix fonciers nominaux sur les 11 zones d'étude durant la « période TransMilenio »

Dans cette sous-section, nous analysons les différences entre les 11 zones d'études dans l'évolution des prix fonciers sur la « période TransMilenio ».

Graphe 38 : Evolutions des prix fonciers courants des 11 zones d'étude affectées par le TransMilenio



Source : Elaboration par l'auteur à partir des données de la LPRB

Entre 1999 et 2001, durant la phase de programmation et de construction du BRT, **le comportement des prix fonciers sur les 11 zones d'étude se différencie selon trois types de dynamiques** :

- La première dynamique consiste en une croissance du prix nominal :
  La zone 1 (+0% en 1999, +33% en 2000, +8% en 2001), la zone 61 (0%, 8%, 0%), la zone 71 (0%, 0%, +5%), la zone 79 (+10%, +14%, +4%), la zone 81 (+0%, +13%, +5%), la zone 82 (+8%, +15%, +9%) et la zone 84 (0%, +3%, +5%) illustrent cette tendance.
- La seconde correspond à la stabilisation des prix nominaux :
  « Directement », la zone 56 (-7%, 0%, 0%), ou par « yo-yo », oscillation avec retour au point de départ, la zone 30 (0%, -7%, +8%) et la zone 69 (-5%, 0%, 5%)
- La troisième consiste en une décroissance des prix :
  La zone 23 (0%, 0%, -10%).

Rappelons que les observations de Jaramillo (Jaramillo, 2004) présentées précédemment montrent que, durant cette période et jusqu'au deuxième semestre 2002, l'ensemble des prix sur les marchés foncier et immobilier sont à la baisse.

Ces trois dynamiques caractérisent la réaction du marché à l'annonce puis à la construction du TransMilenio. **La tendance dominante à la hausse** (7 zones sur les 11 affectées par le TransMilenio) **et même la stabilisation des prix fonciers** (3 zones) **apparaissent donc comme une réaction particulièrement positive du marché à l'annonce et à la construction d'un système de transport de masse dans les zones directement affectées.**

Les phénomènes de « yo-yo » des zones 30 et 69 ainsi que la dépréciation de la zone commerciale 23 en 2001 pourraient s'expliquer par une réaction passagère aux désagréments engendrés par les travaux de construction du TransMilenio. Nous analyserons cela en détail par la suite.

A partir de 2002 commence une période de valorisation modérée mais soutenue du foncier des 11 zones d'étude, selon des taux de croissance annuelle moyens de +4,6% en 2002, +8,3% en 2003, +4,9% en 2004, +5,1% en 2005. Les trois groupes de la phase 1999-2001 ne se retrouvent pas lors de cette deuxième phase : les 11 zones affectées directement connaissent une valorisation dès le début des opérations du TransMilenio.

Nous remarquons que cette valorisation débute dès 2002 alors que sur l'ensemble de l'agglomération Jaramillo montre que cette tendance à la hausse n'apparaît qu'en 2003 et avec un taux légèrement inférieur (+7,8%).

Ainsi **le début des opérations du TransMilenio engendre une valorisation foncière des 11 zones affectées directement par le BRT, et cette valorisation est plus forte et plus précoce que celle observable pour le reste de l'agglomération.**

4) Variation des prix fonciers en termes réels des zones affectées par le TransMilenio

Nous effectuons ces mêmes analyses en tenant compte de l'inflation. Pour passer aux variations des prix en termes réels, l'évolution de l'Indice des Prix aux Consommateurs[91] (IPC) est soustraite aux variations des prix nominaux. Le graphique ci-dessous compare les variations des prix fonciers nominaux avec l'évolution de l'IPC.

Le graphique montre une valorisation foncière réelle croissante dans les 11 zones entre 1991 et 1993, avec une croissance moyenne de 8% en 1991, de 23% en 1992 et de 44% en 1993. Remarquons trois exceptions : en 1991, les zones 81 et 71 connaissent une dépréciation foncière (-4%) et la zone 56 une stabilisation des valeurs foncières (0%).

A partir de 1993, les taux de croissance de la valorisation foncière réelle diminuent dans toutes les zones d'étude, sauf dans les zones 61 et 69 où les taux continuent à croître une année supplémentaire. Jusqu'en 1995 l'ensemble des zones connaissent une valorisation, moindre mais positive.

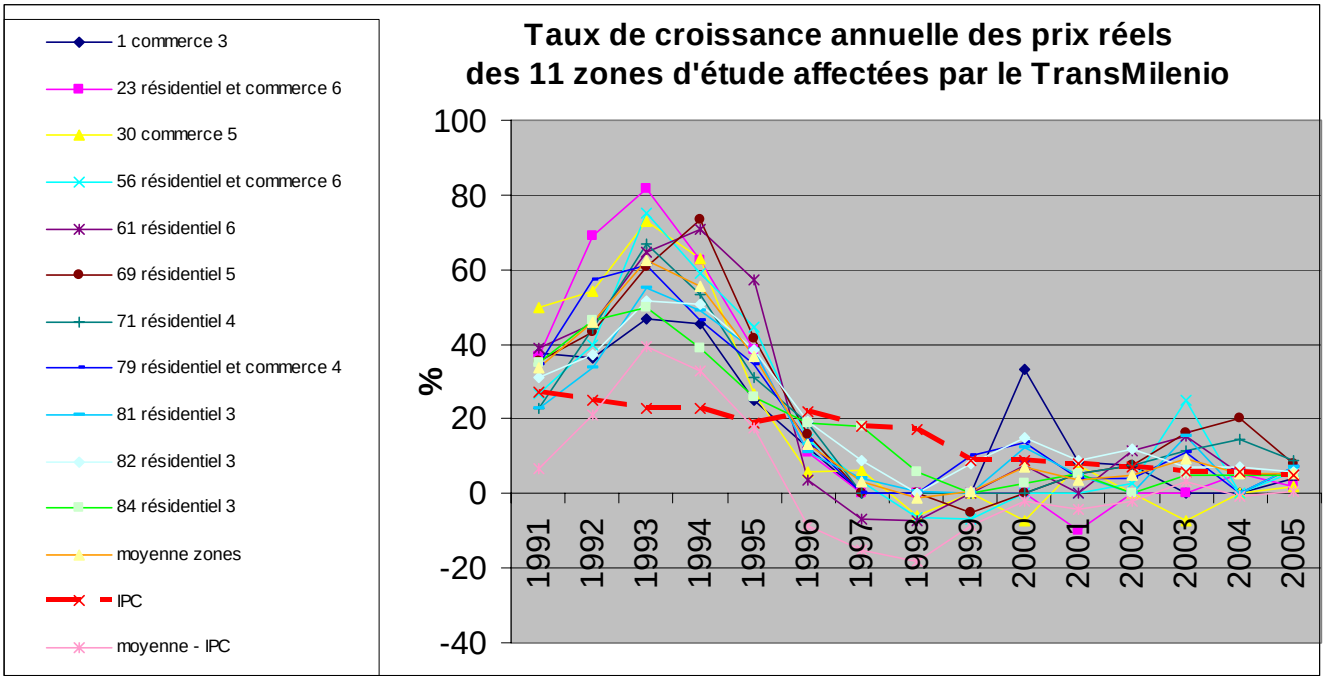
Entre 1996 et 1998, les prix fonciers réels dans les 11 zones diminuent. Cette dévalorisation réelle est en moyenne pour les 11 zones de -9% en 1996, -15% en 1997 et -18% en 1998.

Entre 1999 et 2001, après l'annonce du projet BRT et durant les travaux de construction, en moyenne, le rythme de la dévalorisation foncière réelle se ralentit : -8% en 1999, -2% en 2000 et -4% en 2001. En analysant zone par zone, nous retrouvons les trois dynamiques différentes exposées précédemment.

A partir de 2002, s'amorce une étape de stabilisation, voire de valorisation (+3% en moyenne en 2003).

[91] L'évolution de l'Indice des Prix aux Consommateurs (IPC) est prise comme mesure de l'inflation.

Graphe 39 : Taux de croissance annuelle des prix réels des 11 zones d'étude affectées par le TransMilenio



Source : Elaboration par l'auteur à partir des données de la LPRB

5) Comparaison avec l'évolution des prix fonciers dans des zones similaires mais non-affectées par le TransMilenio

Une comparaison entre deux zones (zones 69 et 71) **en contact direct avec le TransMilenio, et deux zones similaires, contiguës** (zones 67 et 73) **mais non affectées directement par le nouveau système de transport de masse confirme que la planification, la construction mais surtout la mise en opération du TransMilenio affectent significativement les prix fonciers.**

Les zones résidentielles 69 et 67 regroupent des populations aisées (*estrato* 5) ; les zones 71 et 73 sont des lieux de résidence de classes moyennes supérieures (*estrato* 4). Les quatre zones présentent deux à deux des caractéristiques urbanistiques identiques. Elles sont situées dans la même localité (Suba pour les zones 69 et 67, et 73) ou la localité adjacente (Usaquen pour la zone 71). Les zones 69 et 71 sont situées en bordure du corridor BRT de l'Autoroute Nord ; les zones 67 et 73 sont éloignées du TransMilenio.

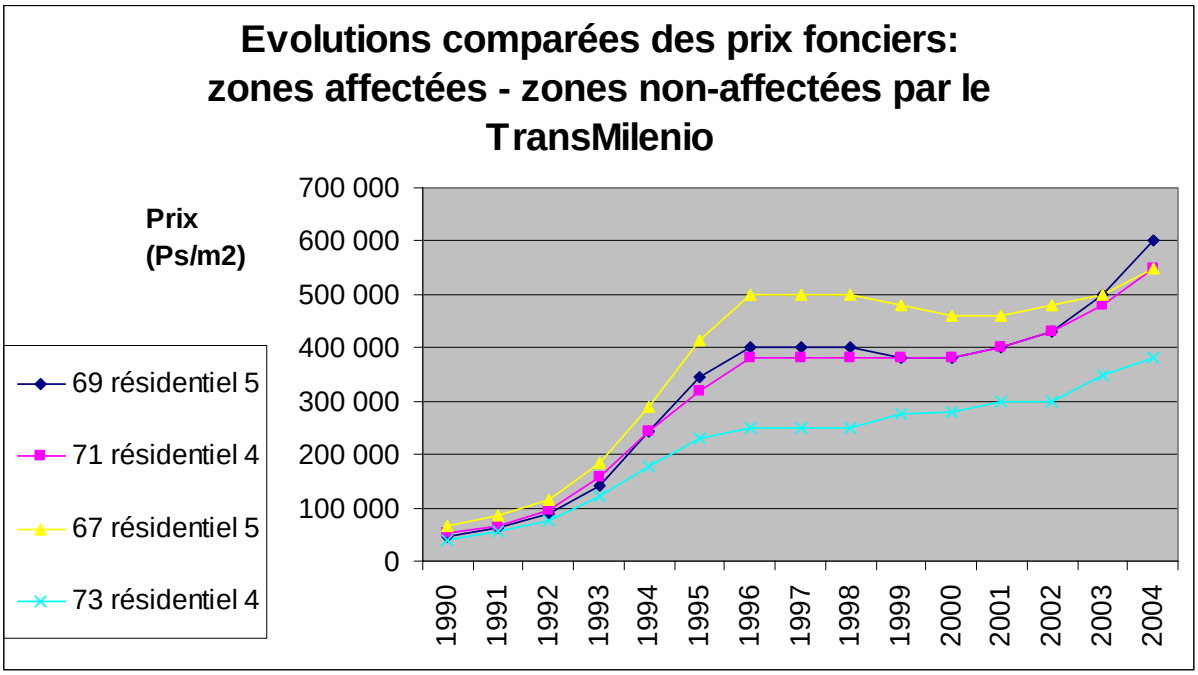
Nous présentons dans l'annexe 9 les caractéristiques de ces quatre zones.

Tableau 38 : Taux de croissance annuelle des prix fonciers des zones 69, 71, 67 et 73.

Zone	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
69	36%	43%	61%	73%	41%	16%	0%	0%	-5%	0%	5%	8%	16%	20%
71	23%	44%	67%	54%	31%	19%	0%	0%	0%	0%	5%	8%	12%	15%
67	31%	35%	59%	57%	44%	20%	0%	0%	-4%	-4%	0%	4%	4%	10%
73	37%	37%	60%	48%	30%	9%	0%	0%	10%	2%	7%	0%	17%	9%

Source : Elaboration par l'auteur à partir de données de la LPRB.

Graphe 40 : Evolutions comparées des prix fonciers : zones affectées – zones non-affectées par le TransMilenio



Source : Elaboration par l'auteur à partir des données de la LPRB

Durant la période 1991-1998, les prix fonciers dans les quatre zones connaissent un comportement similaire : une forte valorisation jusqu'en 1994, une valorisation progressivement plus faible en 1995 et 1996 puis une stabilisation en 1997 et 1998.

Durant la phase (1999 – 2001) de design et de construction du TransMilenio, les prix fonciers dans les deux groupes de zones - affectées et non affectées par le projet BRT - suivent sensiblement les mêmes évolutions.

En 1999, les zones 69 et 67 se dévalorisent légèrement (-5%), la zone 71 se stabilise tandis que la zone 73 se valorise (+10%). En 2000, les prix dans les quatre zones restent relativement stables. En 2001, les zones 69 et 71, en contact direct avec le BRT, et la zone 73 s'apprécient légèrement ; les prix fonciers dans la zone 67 restent stables.

Ce n'est qu'après la mise en opération du TransMilenio en 2002 que des différences significatives dans le comportement des prix fonciers apparaissent.

Dans les quatre zones nous observons une valorisation foncière mais celle-ci est plus soutenue dans les zones directement affectées par le TransMilenio. La valorisation des prix fonciers dans les zones 69 et 71 est supérieure à celle dans les zones plus éloignées du BRT de 1,5% en 2001, 6% en 2002, 4% en 2003, 8% en 2004.

Ainsi nous observons que :

1) **Les prix fonciers dans les 11 zones d'étude connaissent des dynamiques similaires à l'ensemble de la ville avant 1999 ;**

2) **La programmation du projet et la construction du TransMilenio semblent être la cause d'une appréciation des prix fonciers dans les 11 zones affectées par le BRT** entre 1999 et 2001 qui connaissent une évolution inverse de celle à la baisse du reste de la ville ;

3) **À partir de 2002, après la mise en opération du TransMilenio, les zones affectées par le BRT connaissent une valorisation plus rapide et plus forte que celle observée sur l'ensemble de la ville.**

Ces observations confirment donc l'hypothèse d'un effet positif du TransMilenio sur les prix fonciers des zones directement affectées. **Cette appréciation foncière liée au BRT s'observe « dès » l'annonce du projet TransMilenio, se maintient « malgré » les désagréments liés aux travaux et est ensuite plus nette après la mise en opération du système de transport**.

Nous verrons dans la sous-section suivante que les prix fonciers dans les zones aisées et de commerce sont plus sensibles aux désagréments des travaux.

D - *Effets différenciés du TransMilenio sur les prix fonciers selon l'estrato, l'usage des sols et le degré de consolidation*

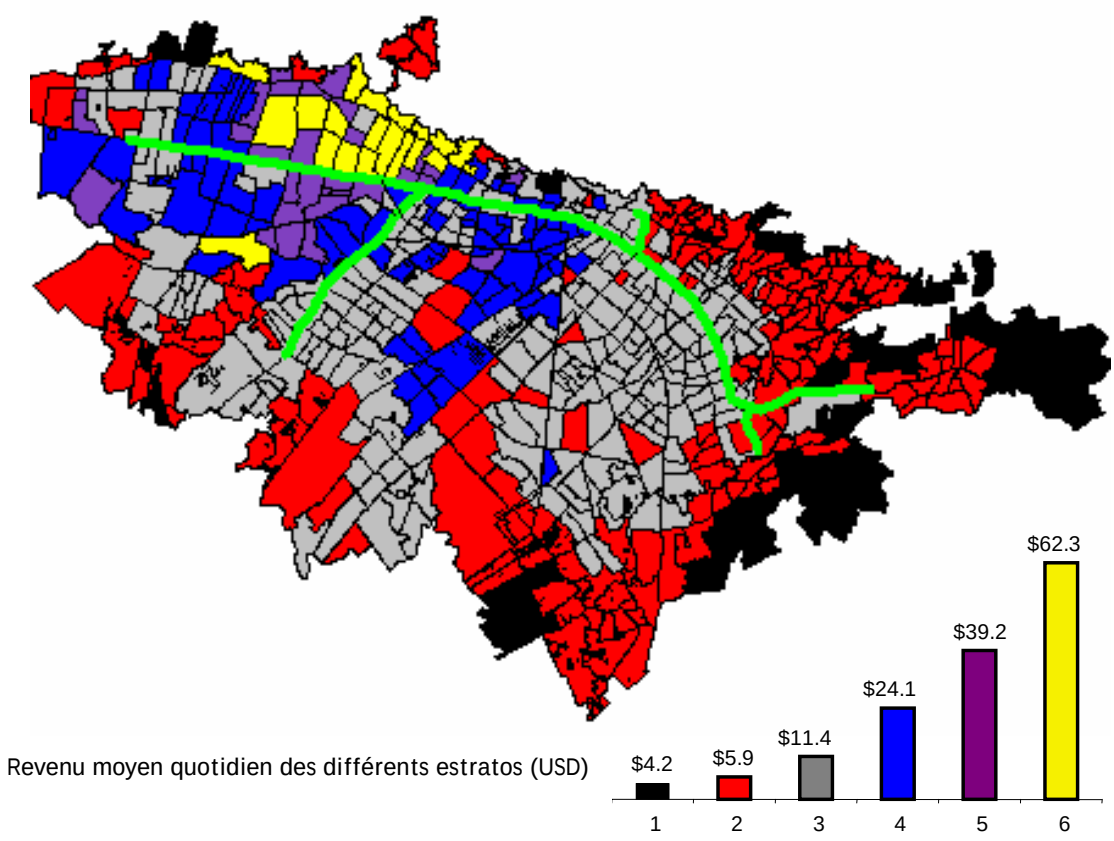
Notre objectif dans cette sous-section est de différencier les effets du TransMilenio sur les prix fonciers en fonction des caractéristiques des zones affectées. Nous étudions trois paramètres : le niveau socio-économique des populations résidentes (l'*estrato*), l'usage dominant des sols et le degré de consolidation.

1) Comparaison de l'évolution des prix fonciers des zones d'étude selon l'*estrato* de la zone

Notre échantillon ne comporte que des zones d'*estratos* 3, 4, 5 et 6, c'est-à-dire de classe moyenne (*estrato* 3), moyenne supérieure (*estrato* 4 et 5) et aisée (*estrato* 6). Nous ne pouvons donc malheureusement pas analyser l'évolution des prix fonciers dans les zones concentrant des populations pauvres.

Cependant nous remarquons sur la carte 14 et le tableau 39 présentés ci-dessous que les quartiers directement affectés par le TransMilenio sont essentiellement des zones de classe moyenne, moyenne supérieure et aisée (68%).

Carte 14 : Distribution spatiale des classes socio-économiques et corridors TransMilenio de la phase 1



Source : Rodriguez, 2000

Tableau 39 : Population et zones desservies par le système TransMilenio. 1999

Estrato	Population	Pourcentage de la population totale desservie
1	96.608	2,08%
2	1.419.615	29,94%
3	2.385.705	50,31%
4	565.351	11,92%
5	151.541	3,20%
6	120.832	2,55%
Total	4.741.740	100%

Source : document CONPES 3093, 2000.

Si les 11 zones étudiées connaissent la même tendance à la hausse puis à la baisse des prix fonciers durant la période 1990 - 1998, nous pouvons remarquer dans le graphe 38 que cette valorisation puis dépréciation foncière est plus accentuée dans les zones occupées par les classes aisées (zones 23, 30, 56, 61) que dans les zones concentrant les classes moyennes (zones 79, 81, 82, 84). Ces observations concordent avec les résultats de Jaramillo (Jaramillo, 2004) présentés dans la section IV.C. du chapitre 3. **Les 11 zones d'étude affectées par le BRT connaissaient donc, avant la période « TransMilenio », des évolutions différenciables selon la classe socio-économique y résidant similaires à l'ensemble de l'agglomération.**

Nous effectuons alors une comparaison de l'évolution des prix fonciers durant la période « TransMilenio » entre les 11 zones d'étude selon la classe socio-économique y résidant (*estrato*). Le tableau 40 présente ces résultats ; les zones sont classées selon l'*estrato*.

Tableau 40 : Comparaison selon l'*estrato* de l'évolution des prix fonciers des 11 zones d'études affectées par le TransMilenio durant la période « TransMilenio »

Corridor BRT affectant la zone d'étude	Zone	*Estrato*	Usages du sol majoritaires	Décision et construction du TransMilenio 1999 - 2001	Opération du TransMilenio 2002 - 2005	Valorisation Globale 1999 - 2005
Av. Jimenez	**1**	**3**	Commerce	Forte Valorisation (+41%)	Faible Valorisation (+12%)	+53%
Autoroute Nord	**81**	**3**	Résidentiel	Valorisation (+18%)	Valorisation (+22%)	+40%
Calle 80	**82**	**3**	Résidentiel	Valorisation (+32%)	Valorisation (+32%)	+64%
Av. Caracas	**84**	**3**	Résidentiel	Faible Valorisation (+8%)	Faible Valorisation (+15%)	+23%
Autoroute Nord	**79**	**4**	Résidentiel	Valorisation (+28%)	Valorisation (+22%)	+50%
Autoroute Nord	**71**	**4**	Résidentiel	Stable (+5%)	Forte Valorisation (+44%)	+49%
Autoroute Nord	**69**	**5**	Résidentiel	Stable (0%)	Forte Valorisation (+52%)	+52%
Autoroute Nord	**30**	**5**	Commerce	Stable en « yo-yo » (à la baisse) (+1%)	Stable / Faible Dévalorisation (-5%)	-4%
Autoroute Nord	**23**	**6**	Résidentiel Commerce	Stable puis Dévalorisation (-10%)	Stable puis Faible Valorisation (+8%)	-2%
Autoroute Nord	**56**	**6**	Résidentiel Commerce	Stable (-7%)	Forte Valorisation (+34%)	+27%
Autoroute Nord	**61**	**6**	Résidentiel	Faible Valorisation (+8%)	Forte Valorisation (+37%)	+45%

Note : < (-5%) : Dévalorisation ; (-5%) – (+5%) : stable ; (+5%) – (+15%) : Faible Valorisation ; (+15%) – (+30%) : Valorisation ; > (+30%) : Forte Valorisation.
Source : Elaboration par l'auteur à partir des données de la LPRB

Trois groupes se dégagent de la comparaison selon l'*estrato* des dynamiques de valorisation foncières observables dans les 11 zones d'étude :

Le premier groupe réunit les zones de classe moyenne (*estratos* 3, zones 1, 81, 82 et 84) et la zone 79 (*estratos* 4) : ces 5 zones ne sont pas affectées négativement par les travaux de construction du TransMilenio, au contraire elles connaissent une valorisation foncière durant la période 1999-2001. Cette valorisation soutenue se continue après 2002, avec la mise en opération du BRT.

Le second groupe rassemble les zones de classe moyenne supérieure (*estratos* 4 et 5, zones 71 et 69) et de classe aisée (*estratos* 6, zones 56 et 61) : les prix fonciers restent stables durant la phase de travaux du BRT, puis connaissent une forte valorisation à partir de la mise en opération du TransMilenio.

Le troisième groupe concerne les zones 30 et 23, de classe moyenne supérieure et aisée, qui ont connue lors de la construction du TransMilenio la même stabilité (avec dévalorisation passagère) des prix fonciers que le groupe précédent mais où la stabilité s'est maintenue après la mise en opération du BRT. Cette stabilité des prix fonciers pourrait s'expliquer dans ces deux zones contiguës par une

modification du règlement d'urbanisme qui n'a pas eu lieu dans les zones du groupe précédent : ces zones étaient classées en « usages mixtes avec conservation » où l'édificabilité maximum était de 6 mètres. En 2002, les nouvelles réglementations d'urbanismes déclaraient ces zones « commerciale(s) avec traitement de rénovation urbaine », avec une édificabilité maximum de 12 mètres. Cette évolution de la réglementation des règles d'urbanisme pourrait expliquer la non-appréciation des valeurs foncières observées.

Ainsi nous pouvons avancer que :

1) **Les travaux de construction n'ont pas eu d'impact négatif sur le foncier des zones concentrant les classes moyennes et aisées**, à peine ont-ils ralenti la valorisation foncière dans les zones aisées.

2) **La mise en opération du TransMilenio coïncide avec une appréciation foncière soutenue, plus violente dans les quartiers aisés, moins dans ceux des classes moyennes**. Ces observations concordent donc avec la distribution spatiale de la hausse des valeurs foncières observée dans le chapitre 3 (chapitre 3.IV.C.3.) pour la période 1970 – 2000.

3) **La modification du règlement d'urbanisme a des effets significatifs sur les évolutions des prix fonciers**.

2) Comparaison de l'évolution des prix foncier des zones d'étude selon l'usage des sols dominant dans la zone

Nous comparons maintenant l'évolution des prix fonciers durant la période « TransMilenio » entre les 11 zones d'étude selon l'usage des sols dominant de la zone. Le tableau 41 présente ces résultats ; les zones sont classées selon l'usage des sols.

Tableau 41 : Comparaison de l'évolution des prix fonciers des 11 zones d'études affectées par le TransMilenio durant la période « TransMilenio » selon l'usage des sols dominant

Corridor BRT affectant la zone d'étude	Zone	*Estrato*	Usages du sol majoritaires	Décision et construction du TransMilenio 1999 - 2001	Opération du TransMilenio 2002 - 2005	Valorisation Globale 1999 - 2005
Autoroute Nord	**81**	**3**	Résidentiel	Valorisation (+18%)	Valorisation (+22%)	+40%
Calle 80	**82**	**3**	Résidentiel	Valorisation (+32%)	Valorisation (+32%)	+64%
Av. Caracas	**84**	**3**	Résidentiel	Faible Valorisation (+8%)	Faible Valorisation (+15%)	+23%
Autoroute Nord	**79**	**4**	Résidentiel	Valorisation (+28%)	Valorisation (+22%)	+50%
Autoroute Nord	**71**	**4**	Résidentiel	Stable (+5%)	Forte Valorisation (+44%)	+49%
Autoroute Nord	**69**	**5**	Résidentiel	Stable (0%)	Forte Valorisation (+52%)	+52%
Autoroute Nord	**61**	**6**	Résidentiel	Faible Valorisation (+8%)	Forte Valorisation (+37%)	+45%
Autoroute Nord	**23**	**6**	Résidentiel Commerce	Stable puis Dévalorisation (-10%)	Stable puis Faible Valorisation (+8%)	-2%
Autoroute Nord	**56**	**6**	Résidentiel Commerce	Stable (-7%)	Forte Valorisation (+34%)	+27%
Av. Jimenez	**1**	**3**	Commerce	Forte Valorisation (+41%)	Faible Valorisation (+12%)	+53%
Autoroute Nord	**30**	**5**	Commerce	Stable en « yo-yo » (à la baisse) (+1%)	Stable / Faible Dévalorisation (-5%)	-4%

Source : Elaboration par l'auteur à partir des données de la LPRB

Malgré la faible taille de notre échantillon, une comparaison de l'évolution des prix fonciers selon l'usage majoritaire de chaque zone d'étude met en exergue **une valorisation globale plus forte pour les zones résidentielles que pour les zones de commerce.**

Ce résultat est donc en contradiction avec la distribution spatiale de l'appréciation foncière selon le type d'usage des sols observée pour la période 1970 – 2000 au niveau de la ville entière (cf. Chapitre 3.IV.C.3.). Nous pouvons supposer que cette inversion sur le court terme s'explique d'une part par un effet négatif des travaux de construction du BRT plus important sur les activités commerciales et d'autre part par le faible recul temporel de notre analyse des conséquences foncières de cette nouvelle infrastructure de transport.

Parmi les zones à prédominance commerciale, seule la zone 1, le Eje Ambiental, connaît une appréciation foncière globale particulièrement significative. Le Eje Ambiental concentre des activités de commerce et de service et fait partie du CBD de Bogota. Sous-valorisée avant la construction du TransMilenio pour des raisons d'insécurité et de forte congestion, cette zone a fait l'objet d'un important plan de rénovation de l'espace public : piétonisation des principaux axes et construction d'un important parc, le TercerMilenio, à l'emplacement du bidonville réputé, le Cartucho où se concentraient une population marginalisée et les trafics illégaux, de drogue notamment. Le Eje Ambiental est une des zones de la ville qui a connu ces six dernières années les plus grandes transformations, ce qui a permis de réactiver son importance économique. Il apparaît donc logique que les prix fonciers aient connu une violente appréciation (+33% en 2000). Si nous confrontons cette évolution avec d'autres zones similaires, concentrant des commerces et services, mais bénéficiant ni

du TransMilenio ni d'une politique de reconquête de l'espace public dégradé, les résultats sont encore plus probants : les prix fonciers du Centre International sont stables sur la période 1999 – 2005 ; les prix fonciers du quartier Ciudad Salitre se stabilisent après une appréciation de 4% en 2000.

Photo 21 : Piétonisation du Eje Ambiental

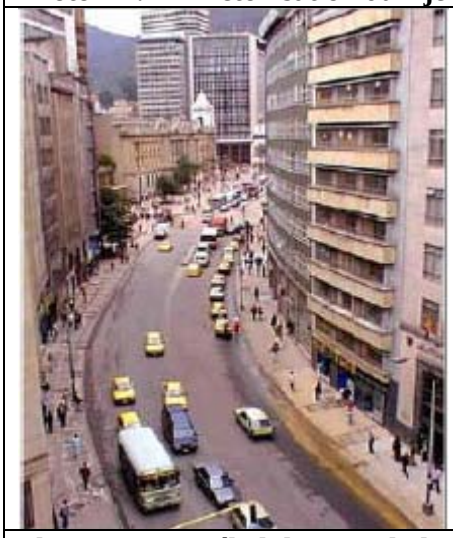




Photo 22 : Réhabilitation du bidonville El Cartucho (1998 – 2000)





Source : D. Hidalgo, 2004.

Nous observons aussi que **les zones commerciales semblent avoir été légèrement affectées négativement par les travaux de construction du BRT, à la différence des zones résidentielles**.

Enfin la zone 56 montre une forte valorisation dès la mise en opération du TransMilenio, ce qui semble indiquer une sensibilité des prix fonciers des zones commerciales à l'évolution de l'accessibilité. Cette appréciation ne se retrouve pas dans les zones 23 et 30 ; cela peut s'expliquer par les modifications des règles d'urbanisme présentées précédemment.

Nous pouvons alors soutenir que :

1) **La valorisation globale a été plus importante dans les zones résidentielles que commerciales** ; Ce résultat est donc en contradiction avec la distribution spatiale de la hausse des valeurs foncières selon l'usage des sols observée pour la période 1970 – 2000 (cf. Chapitre 3.IV.C.3.). Nous supposons que cette inversion sur le court terme s'explique par une sensibilité plus forte des zones commerciales aux travaux de construction et par le faible recul temporel de notre étude.

2) **Les zones commerciales ont été affectées négativement pas les travaux de construction du BRT** ;

3) **La mise en opération du TransMilenio a un effet positif significatif sur l'appréciation foncière des zones commerciales**. Ce qui semble indiquer une forte sensibilité des prix fonciers des zones commerciales à l'évolution de l'accessibilité de la zone.

4) **Les interventions massives sur l'espace public** (Eje Ambiental) **ont des effets directs et importants sur la valorisation foncière**.

3) Comparaison de l'évolution des prix fonciers des zones d'étude selon le degré de consolidation de la zone

Nous nous intéressons maintenant aux différences de comportement des prix fonciers selon le degré de consolidation[92] des zones d'étude. Le tableau 42 présente ces résultats ; les zones sont classées par ordre décroissant de consolidation.

Remarquons que ce degré de consolidation est corrélé avec la distance à la centralité axiale historique, l'avenue Caracas. Les observations de ce paragraphe sont donc à mettre en parallèle avec un phénomène de diffusion de la centralité historique le long des corridors BRT que nous analyserons par la suite.

Tableau 42 : Comparaison de l'évolution des prix fonciers des 11 zones d'études affectées par le TransMilenio durant la période « TransMilenio » selon le degré de consolidation

Corridor BRT affectant la zone d'étude	Zone	*Estrato*	Usages du sol majoritaires	Décision et construction du TransMilenio 1999 - 2001	Opération du TransMilenio 2002 - 2005	Valorisation Globale 1999 - 2005
Av. Jimenez	**1**	**3**	Commerce	Forte Valorisation (+41%)	Faible Valorisation (+12%)	+53%
Autoroute Nord	**30**	**5**	Commerce	Stable en « yo-yo » (à la baisse) (+1%)	Stable / Faible Dévalorisation (-5%)	-4%
Autoroute Nord	**23**	**6**	Résidentiel Commerce	Stable puis Dévalorisation (-10%)	Stable puis Faible Valorisation (+8%)	-2%
Autoroute Nord	**56**	**6**	Résidentiel Commerce	Stable (-7%)	Forte Valorisation (+34%)	+27%
Autoroute Nord	**61**	**6**	Résidentiel	Faible Valorisation (+8%)	Forte Valorisation (+37%)	+45%
Autoroute Nord	**69**	**5**	Résidentiel	Stable (0%)	Forte Valorisation (+52%)	+52%
Autoroute Nord	**71**	**4**	Résidentiel	Stable (+5%)	Forte Valorisation (+44%)	+49%
Autoroute Nord	**81**	**3**	Résidentiel	Valorisation (+18%)	Valorisation (+22%)	+40%
Autoroute Nord	**79**	**4**	Résidentiel	Valorisation (+28%)	Valorisation (+22%)	+50%
Calle 80	**82**	**3**	Résidentiel	Valorisation (+32%)	Valorisation (+32%)	+64%
Av. Caracas	**84**	**3**	Résidentiel	Faible Valorisation (+8%)	Faible Valorisation (+15%)	+23%

Source : Elaboration par l'auteur

[92] Nous reprenons la définition du concept de consolidation présentée dans la section IV.B du chapitre 3 : « développement urbain centripète ; l'espace déjà urbanisé connaît des transformations et des processsus de redensifications rapides, qui contribuent, avec une occupation plus générale de l'espace à l'intérieur du périmètre urbain, à une augmentation de la densité moyenne » (Dureau, 2000).

Dans le tableau ci-dessus les zones d'étude sont classées par degré de consolidation décroissant.

Durant la phase de design et de construction du BRT (1999 – 2001), nous observons que **les zones les moins consolidées** - les zones 79 (au Nord), 81 et 82 (à l'Ouest) et 84 (au Sud) - **connaissent une valorisation foncière significativement plus forte que les zones appartenant à la centralité axiale historique**. En mettant à part la zone 1 qui, comme nous l'avons décrit précédemment, a fait l'objet d'une intervention urbanistique particulière, les zones d'étude déjà consolidées en 1999 (zones 23, 30, 56, 61, 69, 71 et 81) voient leurs prix fonciers se stabiliser.

Cette tendance s'inverse dès la mise en opération du TransMilenio. En effet **à partir de 2002, ce sont les zones déjà consolidées qui connaissent la valorisation foncière la plus forte**. Nous mettons à part les zones 23 et 30 qui comme nous l'avons expliqué précédemment ont connu une réforme de leur règlement d'urbanisme (doublement de la hauteur maximum des immeubles) qui pourrait expliquer leur non-appréciation foncière.

Globalement, **sur l'ensemble des deux phases de la période « TransMilenio » (1999 – 2005), ce sont les zones moins consolidées du Nord** (79) **et surtout de l'Ouest** (82) **qui connaissent la plus forte valorisation foncière**. La zone faiblement consolidée du Sud de Bogota (zone 84) fait donc exception. Mais le faible recul temporel ne nous permet de conclure définitivement sur les différences d'appréciation foncière en fonction du degré de consolidation.

Ces observations concordent avec l'analyse effectuée dans le chapitre 3 (cf. Chapitre 3.IV.C.3.) de la distribution spatiale de l'appréciation foncière sur la période 1970 – 2000 selon le niveau de consolidation des zones urbaines. Notre analyse menée sur différentes périodes (1980 – 1988, 1960 – 1997 puis 1991-1995) concluait à l'indétermination « dans l'absolu » de la préférence entre des zones consolidées et des zones non-consolidées pour les choix de localisation des investissements. Il semble que l'influence du niveau de consolidation de la zone dans l'attraction des investissements varie selon les périodes et dépend des dynamiques de structuration s'exerçant à l'échelle de la ville.

Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer la relativement faible valorisation foncière de la zone 84, au Sud de Bogota, aussi bien durant la phase de design et de construction du BRT (1999 – 2001) que après sa mise en opération (2002 – 2005).

Tout d'abord la localisation géographique de cette zone au Sud de Bogota la rattache à la partie pauvre de la ville, moins attractive.

Ensuite l'amélioration de la mobilité des quartiers plus au Sud de la zone d'étude 84, favorisant l'expansion urbaine vers la municipalité de Soacha, a pu diminuer la pression sur le foncier dans la zone d'étude. Aujourd'hui Soacha est intégrée à Bogota dans une conurbation continue ; à tel point que l'extension du TransMilenio jusqu'au centre de Soacha est en tête de liste des projets d'extension future du BRT.

Enfin la taille importante de la zone d'étude augmente d'autant l'inconvénient d'utiliser des valeurs foncières moyennes. Les experts locaux interrogés s'accordent à dire que les lots proches des corridors TransMilenio ont connu une appréciation foncière qui aurait relativement atténuée la stagnation, voire la décroissance des prix fonciers dans l'ensemble de la zone d'étude. Malheureusement nous n'avons pas de données pour mesurer ces écarts.

A l'opposé, la zone 82, située à la périphérie Nord-ouest de Bogota, le long du corridor BRT de la Calle 80, connaît la plus forte valorisation foncière sur l'ensemble de la période « TransMilenio » (+64%) de toutes les zones d'études. Cette appréciation foncière a été importante aussi bien durant la phase de construction du TransMilenio (+32%) que depuis la mise en opération (+32%). L'urbanisation dans le Nord-Ouest de Bogota, et notamment dans la zone 82 est récente ; elle a commencé au début des années 1980 avec la construction de l'autoroute vers Medellin, la Calle 80. Cette urbanisation a été surtout le fait de la classe moyenne qui voyait dans ce choix de localisation un moyen de se rapprocher des zones d'emploi concentrées le long de la centralité axiale historique de l'avenue Caracas – Autoroute Nord et dans l'Ouest de la ville le long de la Calle 26. Les prix fonciers relativement accessibles permettaient à ces populations de se loger convenablement. Les quartiers Nord-Ouest sont d'ailleurs considérés dans le Plan d'Urbanisme de 2000 (révisé en 2004) comme une

zone d'expansion pour les dix prochaines années (Cf. carte 19). Cependant l'accessibilité de cette zone se dégradait rapidement durant la dernière décennie du 20ème siècle, du fait de l'incapacité des infrastructures de transports traditionnelles à suivre cette urbanisation massive et rapide. Nous comprenons alors le bol d'air que constitue le projet BRT pour ces zones. Aujourd'hui, avec le TransMilenio, les habitants mettent une vingtaine de minute pour atteindre le centre ville.

L'exemple de la forte valorisation observée sur les marchés immobilier et foncier – liée au développement résidentiel et surtout commercial que nous analyserons par la suite - autour du portal (terminus) du corridor BRT de la Calle 80 aide à comprendre l'impact du TransMilenio sur les zones Nord-Ouest directement affectées, et plus généralement sur les quartiers en cours de consolidation.

La construction du corridor de la Calle 80 et de son portal avait pour objectif d'améliorer l'accès au centre ville pour les populations du Nord-Ouest de Bogota et des municipalités voisines (Funza, Mosquera et Madrid). Ainsi le portal de la Calle 80 génère un flux de 200.000 passagers par jour.

L'amélioration de l'accessibilité eut des conséquences importantes sur le marché immobilier : en 2000, un appartement standard de la cité Colsubsidio (cf. photo 23 et 24) valait 21.000.000 Pesos (soit 28.000.000 en Pesos 2005 constant) ; en 2005 son prix avait augmenté à 50.000.000 Pesos, soit une appréciation de 79% en 5 ans (www.colsubsidio.com).

L'impact du TransMilenio dans la zone fut tel qu'un centre commercial de grande dimension (82.000 m2) fut construit en 2003. La parcelle (31.500 m2) sur laquelle fut construit le centre commercial fut évaluée en 1999 à 260.000 Pesos/m2. Elle fut vendue une première fois en 2003 à 700.000 Pesos/m2, puis une seconde fois en 2005 à 1.000.000 Pesos/m2, soit une valorisation de 127% si l'on tient compte de l'inflation.

Photo 23 : La cité Colsubsidio



source : www.colsubsidio.com

Photo 24 : Portal du corridor BRT de la Calle 80



Source : zero-fractal

Ainsi **le faible recul temporel ne nous permet pas de conclure définitivement sur les différences d'appréciation foncière en fonction du degré de consolidation.**

Globalement, sur la période « TransMilenio » (1999 – 2005), les zones moins consolidées connaissent la plus forte valorisation foncière. Mais **ce résultat global est la combinaison de deux tendances contraires.** Durant la phase de design et construction du BRT (1999 – 2001), les zones les moins consolidées connaissent une valorisation foncière significativement plus forte que les zones appartenant à la centralité axiale historique. Cette tendance s'inverse dès la mise en opération du TransMilenio.

E - *Conclusions générales sur la valorisation foncière liée à la construction du BRT*

Cette analyse confirme les effets significatifs du TransMilenio sur les marchés immobiliers (locatif, achat-vente de l'ancien et du neuf) et foncier.

Les études de prix hédoniques (Barrios, 2002 ; Targa, 2003) montrent que la proximité au TransMilenio affecte significativement les loyers le long des corridors BRT, mais qu'elle n'est pas l'unique responsable de cette appréciation : l'amélioration du cadre de vie (pollution auditive, de l'air et sécurisation) impacte autant si ce n'est plus les loyers que l'accessibilité.

Ainsi un système de Transport Rapide de Masse comme le BRT ne doit pas être considéré seulement comme une infrastructure de transport se sur-imposant aux infrastructures urbaines mais bien comme un projet urbanistique global interagissant avec la structure urbaine préexistante.

Ensuite l'analyse comparative que nous effectuons à partir des données recueillies à la LPRB conclut que la valorisation foncière concerne les zones desservies par le TransMilenio dans leur globalité, et non simplement les premières franges le long des corridors BRT.

Nous montrons que cette appréciation foncière liée au TransMilenio s'observe dès l'annonce du projet TransMilenio, se maintient malgré les désagréments liés aux travaux et est ensuite plus flagrante après la mise en opération du système de transport.

Cette hausse des valeurs foncières dans les zones directement en contact avec le TransMilenio est plus forte et plus précoce que l'appréciation moyenne de l'agglomération mais aussi que celle de l'ensemble des zones en valorisation.

Notre étude met donc en exergue des stratégies d'anticipation de la part des investisseurs.

D'autre part notre analyse comparative met en exergue que les effets du BRT sur les prix fonciers sont différenciables selon le niveau économique des populations résidant dans la zone considérée (plus le niveau socio-économique des populations s'élève, plus la hausse des valeurs foncières est forte) et selon l'usage dominant des sols de la zone affectée (valorisation globale plus importante dans les zones résidentielles que commerciales, effets négatifs des travaux de construction sur les zones commerciales, récupération lors de la mise en opération du BRT). Par contre, notre analyse ne nous permet pas de conclure sur les différences d'appréciation foncière en fonction du degré de consolidation.

Enfin notre étude met en exergue les effets directs et importants sur la valorisation foncière des interventions urbanistiques sur l'espace public (récupération de l'espace public, piétonisation, parc) et des modifications du règlement d'usage des sols (modification du COS).

Ainsi l'analyse que nous développons dans cette section montre que les effets du TransMilenio s'insèrent dans l'évolution cyclique des prix fonciers sur l'ensemble de l'agglomération. La nouvelle infrastructure de Transport accentue les tendances et accélère la reprise de la croissance dans les zones desservies. Le projet BRT coïncide plus ou moins avec la fin de la phase de dépréciation foncière.Il est donc difficile d'établir si, à lui seul, il aurait été capable d'inverser localement le cycle global. Le TransMilenio semble plus agir comme un catalyseur de la reprise des investissements et de l'activité immobilière vers ses zones d'influence. Et cet effet positif se manifeste dès l'annonce du projet.

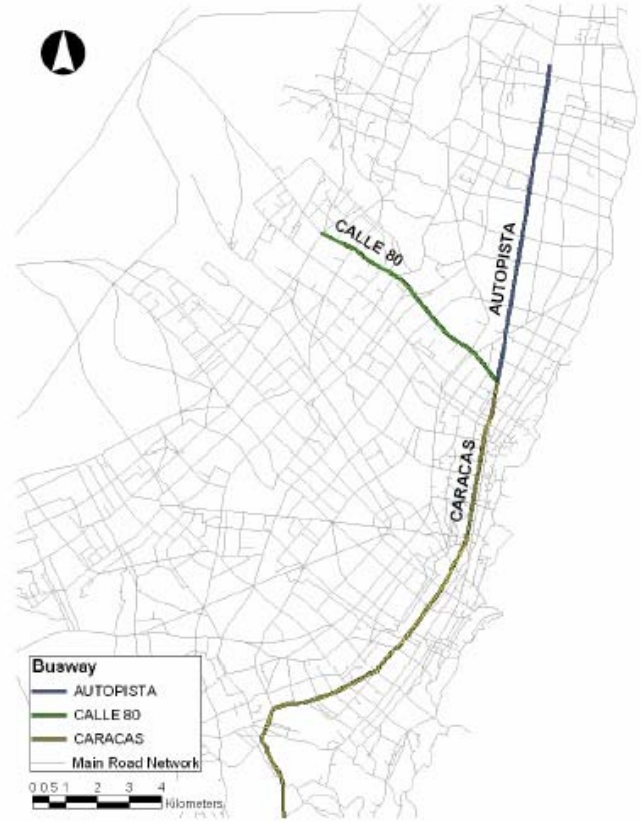
D'autre part nous pouvons noter que cette valorisation foncière liée au BRT semble s'effectuer en accord avec la distribution spatiale de l'appréciation foncière observée pour la période 1970 – 2000 (cf. Chapitre 3.IV.C.3.). En effet la valeur du sol s'apprécie d'autant plus intensément que l'*estrato* du quartier est élevé. La relation entre les taux de valorisation et le niveau de consolidation varie en fonction de la phase analysée. Nous supposons que l'inversion dans la distribution spatiale de la valorisation foncière - selon le type d'usage du foncier observée sur le court terme de la « période TransMilenio » par rapport à celle constatée sur long terme de la période 1970 – 2000 -, s'explique par une sensibilité plus forte des zones commerciales aux travaux de construction.

II - Effets du TransMilenio sur l'intensité de l'usage des sols le long des corridors BRT

Dans cette deuxième section, nous analysons un premier aspect de l'évolution des dynamiques d'occupation de l'espace urbain liée à l'introduction du TransMilenio : l'intensité de l'usage des sols le long des corridors BRT.

Nous nous appuyons sur les travaux de Grobbeiro et Robazza (Grobbeiro, Robazza, 2005) pour analyser l'évolution de l'intensité de l'usage des sols le long des corridors BRT à partir de six critères : le pourcentage d'appartements non-occupés, le nombre de résidence en location et en vente, l'espace vacant, les constructions neuves et les rénovations, la hauteur des édifices et le taux d'occupation des appartements.

Carte 15 : Les corridors BRT de la première phase



Source : Ardila, 2004

Un premier élément qui permet d'évaluer l'impact du TransMilenio sur l'intensité de l'usage des sols le long de ses corridors est *l'évolution du pourcentage d'appartements non-occupés par rapport à la totalité des appartements d'une zone* (tableau 43). **Entre 2000 et 2003, ce pourcentage est passé en moyenne de 13,7% à 7,8%** (Grobbeiro, Robazza, 2005) le long des trois corridors BRT construit lors de la première phase – Avenue Caracas, Autoroute Nord, Calle 80. Les améliorations dans l'accessibilité, la sécurité et la qualité de vie permises par le TransMilenio sont probablement à l'origine de cette densification. Ce phénomène est cependant plus évident dans le centre historique et au Sud de la ville où les pourcentages d'appartements vacants étaient plus importants et où la qualité de vie était plus dégradée que dans le reste de la ville.

Tableau 43 : Evolution du pourcentage d'appartements vacants le long des corridors BRT

Corridor BRT	Appartement vacant 2000	Appartement vacant 2003
Sud	19,2%	9,4%
Centre	30,4%	15,6%
Nord	8,4%	6,6%
Ouest (Calle 80)	2,2%	2,7%
Total	**13,7%**	**7,8%**

Source : Grobbeiro, Robazza, 2005

Un deuxième élément d'évaluation des effets du TransMilenio sur l'intensité de l'usage des sols le long des corridors BRT est *l'évolution du nombre de résidences en location et en vente* le long des corridors (tableau 44). (Grobbeiro, Robazza, 2005) constatent que **ces deux formes de circulation des logements existants suivent des comportements par macro-zone : ils sont en augmentation au Sud et au Centre et en diminution au Nord et le long de la Calle 80.**

Nous pouvons penser que l'augmentation au Sud et au Centre s'explique par le fait que les appartements vides sont nombreux, malgré la forte croissance du taux d'occupation présentée précédemment. Nous pouvons aussi noter la préférence des propriétaires du centre à louer plutôt qu'à vendre. Cette dernière observation s'explique certainement par un phénomène d'anticipation d'une augmentation des prix, lié à la confiance dans les opérations de renouvellement urbain menées depuis une dizaine d'années.

Au nord, la diminution des espaces en location ou en vente est probablement due au moindre pourcentage de résidence vide disponible.

Le Nord-Ouest, le long de la Calle 80 se distingue en tout point du reste de la ville. En ce qui concerne les appartements à louer, c'est la seule zone avec un pourcentage aussi élevé en 2000 et qui a connu en 3 ans une chute aussi importante. Du fait de la très forte congestion de la Calle 80 à la fin du 20ème siècle, le Nord-Ouest de la ville peut être considérée comme la partie de la ville la plus intéressée par l'introduction du système BRT. Les propriétaires étaient probablement déjà prêts à profiter de la reprise du marché immobilier qui allait inévitablement accompagner l'arrivée du TransMilenio dans cette zone.

Nous observons donc des **phénomènes d'anticipation des effets du TransMilenio sur l'intensité et l'usage du foncier.**

Tableau 44 : Evolution du nombre de résidences à la location et à la vente le long des corridors BRT.

Corridor BRT	**Appartement en location 2000**	**Appartement en location 2003**
Sud	0,8%	1,3%
Centre	0%	3%
Nord	3,8%	1,9%
Ouest (Calle 80)	13,6%	1,7%
Total	**4,2%**	**1,8%**
	Appartement à vendre 2000	**Appartement à vendre 2003**
Sud	0,7%	1,3%
Centre	0%	3%
Nord	2,7%	1,9%
Ouest (Calle 80)	0,8%	1,7%
Total	**1,4%**	**1,8%**

Source : Grobbeiro, Robazza, 2005

Un troisième critère d'évaluation est *la superficie foncière vacante* dans les différentes aires urbaines contiguës au BRT (tableau 45). **La superficie foncière vacante a fortement diminué (-41%) en 3 ans le long des trois corridors BRT** (Grobbeiro, Robazza, 2005). Ceci confirme une tendance à la densification et la consolidation urbaine. L'évolution la plus importante se constate le long de la Calle 80, moins dense et moins consolidée en 2000, les effets du TransMilenio y sont plus évidents.

Tableau 45 : Evolution de l'espace vacant dans les zones le long des corridors BRT.

Corridor BRT	**Parcellaire vacant 2000**	**Parcellaire vacant 2003**	**variation**
Sud	21,1%	12,4%	-41%
Centre	30,7%	21%	-32%
Nord	15,5%	11%	-29%
Ouest (Calle 80)	17,9%	6,3%	-65%
Total	**19,9%**	**11,7%**	**-41%**

Source : Grobbeiro, Robazza, 2005

Un quatrième élément d'évaluation est *le nombre de constructions neuves et de rénovation.* Grobbeiro et Robazza ont collecté auprès du DAPD l'ensemble des licences de construction, obligatoires pour toutes nouvelles constructions ou travaux de restauration de l'existant, octroyées entre 1999 et 2003.

Suite à la crise de la fin de la décennie 1990 qui s'est traduite par une forte décroissance de la construction immobilière, l'augmentation du nombre de permis concédés en 2003 semble indiquer une reprise du secteur. Grobbeiro et Robazza (Grobbeiro, Robazza, 2005) observent que **le nombre de licences de construction autorisées le long des corridors BRT a une croissance supérieure à celui des licences octroyées sur l'ensemble de l'agglomération**.

Les informations sur le type de licences octroyées le long des corridors BRT entre 1999 et 2003 montrent une forte croissance des licences pour « modification de l'existant » (3,3% en 1999 contre 23,5% en 2003) et des licences de « réparation » (0% en 1999 contre 13,2% en 2003). Parallèlement nous observons que si les licences de « nouvelle construction » restent majoritaires, leur part diminue fortement, passant de 71,8% en 2000 à 42,7% en 2003.

A partir de ces données nous pouvons penser qu'il y eut **une phase d'anticipation qui s'est traduite par de nouvelles constructions le long des corridors BRT, suivie d'une phase d'investissement orienté vers le parc immobilier existant**.

Un cinquième élément d'analyse des effets du TransMilenio est *l'évolution de la hauteur des édifices* dans les zones contiguës aux corridors BRT. Grobbeiro et Robazza (Grobbeiro, Robazza, 2005) observent **que la hauteur moyenne des immeubles augmenta de 3,174 étages en 2000 à 3,366 étages en 2003.** Pour une bonne part, ces résultats sont liés au développement des parties pauvres de la ville, le Sud et l'Ouest. Ils peuvent donc être considérés à la fois comme une conséquence de la plus grande attractivité liée au TransMilenio mais aussi comme un effet de l'amélioration du contexte macro-économique au début du 21ème siècle.

Enfin un sixième élément d'analyse est *l'évolution du taux d'occupation des appartements* le long des corridors BRT. **En 3 ans le nombre moyen de personnes vivant dans le même appartement passa de 4,36 à 6,89 personnes** (Grobbeiro, Robazza, 2005). Cette augmentation du taux d'occupation s'observe dans les quartiers de classe moyenne et pauvre, dans le centre historique, au Sud et le long de la Calle 80. Ces résultats expriment une préférence de la classe moyenne et pauvre à vivre près des corridors TransMilenio. Ces populations acceptent de réduire leur espace de vie pour économiser temps et argent sur leur déplacement quotidiens mais certainement aussi pour partager l'augmentation des loyers.

Tableau 46 : Evolution du taux d'occupation des appartements le long des corridors BRT

Corridor BRT	**Nombre de personne par habitation 2000**	**Nombre de personne par habitation 2003**
Sud	4,89	6,62
Centre	3,84	5,50
Nord	4,24	4,56
Ouest (Calle 80)	4,03	9,02
Total	**4,36**	**6,89**

Source : Grobbeiro, Robazza, 2005

Ces six observations convergent vers un même **constat d'intensification de l'usage du foncier le long des corridors BRT**. **Nous observons en effet des phénomènes de consolidation – les espaces vacants disparaissent - et de densification – chaque parcelle foncière est utilisée plus intensément.** Le TransMilenio jouerait ainsi un rôle important dans l'attractivité des zones directement affectées.

D'autre part nous observons **des phénomènes d'anticipation des effets du TransMilenio sur l'intensité et l'usage du foncier de la part des investisseurs et des propriétaires fonciers et immobiliers.**

III - Effets du TransMilenio sur la distribution spatiale des activités et résidences le long des corridors BRT

Nous analysons dans cette quatrième section un nouvel aspect des effets du TransMilenio sur les dynamiques d'occupation de l'espace : l'usage des sols.

Nous étudions dans un premier temps l'évolution de l'usage des sols le long des corridors BRT selon deux grandes fonctions urbaines : usages résidentiels et usages pour des activités productives. Dans un second temps nous étudions les modifications du type d'activités au sein de la fonction productive présente le long des corridors BRT.

Cette section s'appuie également sur les travaux de Grobbeiro et Robazza (Grobbeiro, Robazza, 2005).

A - *La substitution « résidence pour tertiaire » le long des corridors BRT*

Grobbeiro et Robazza (Grobbeiro, Robazza, 2005) analysent la substitution « résidence pour tertiaire » sur la première frange d'immeuble le long des corridors BRT (tableau 47).

Sur l'ensemble des corridors BRT construits lors de la première phase, les résultats ne sont pas très significatifs. Grobbeiro et Robazza observent une **légère augmentation de la proportion de commerces et services, passant de 58,2% en 2000 à 60,4% en 2003** (soit 2,2% de substitution) (Grobbeiro, Robazza, 2005). Cependant il faut noter que ces analyses furent effectuées peu de temps après la mise en opération du BRT.

Grobbeiro et Robazza (Grobbeiro, Robazza, 2005) étudient alors les différences de substitution « résidence pour tertiaire » selon le degré de consolidation et de saturation en commerce et service des différentes aires urbaines. Ces auteurs observent que l**'évolution est plus forte au Sud et le long de la Calle 80**, avec des substitutions respectives de 6,2% et 3,1%. Ces substitutions « résidence pour tertiaire » plus importantes au Sud et au Nord-Ouest peuvent être expliquées d'une part par les **plus faibles coûts du foncier et de l'immobilier** dans ces deux secteurs urbains et d'autre part parce que les effets du TransMilenio sur l'**amélioration du tissu urbain** furent plus significatifs dans ces quartiers plus pauvres. Au contraire, **le long des corridors Nord et centraux, les substitutions sont plus faibles du fait du degré déjà élevé de consolidation et de saturation en commerce**.

Tableau 47 : Substitution « résidences pour commerces » le long des corridors BRT

Corridor BRT	2000		2003		Substitution «Résidentiel→tertiaire»
	Résidentiel	Tertiaire	Résidentiel	Tertiaire	
Sud	53,8%	46,2%	46,2%	53,8%	6,2%
Centre	33,5%	66,5%	33,5%	66,5%	0%
Nord	26,4%	73,6%	28,4%	71,6%	-1%
Nord-Ouest (Calle 80)	53,3%	46,7%	50,4%	49,8%	3,1%
Total	**41,8%**	**58,2%**	**39,6%**	**60,4%**	**2,2%**

Source : Grobbeiro, Robazza, 2005

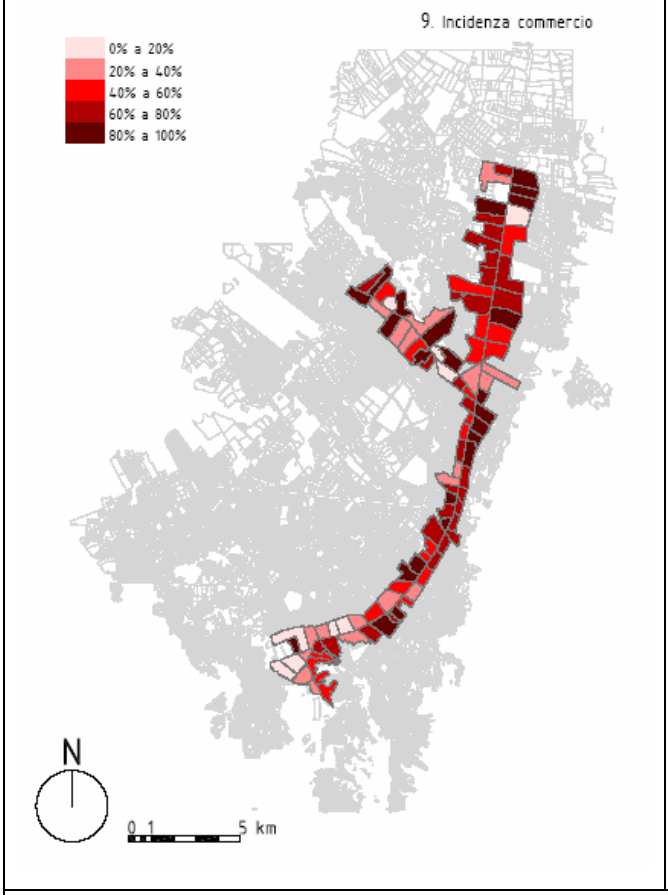
D'autre part Grobbeiro et Robazza (Grobbeiro, Robazza, 2005) notent que **l'évolution des licences de construction octroyées le long des corridors BRT confirme cette tendance à la substitution « résidence pour tertiaire »** : en terme de superficie, les licences de construction et d'extension sont de plus en plus déposées pour des commerces, des bureaux et l'administration. En

1999, les licences résidentielles représentaient 53% du total des licences octroyées le long des futurs corridors BRT ; en 2003, elles ne représentent plus que 24%.

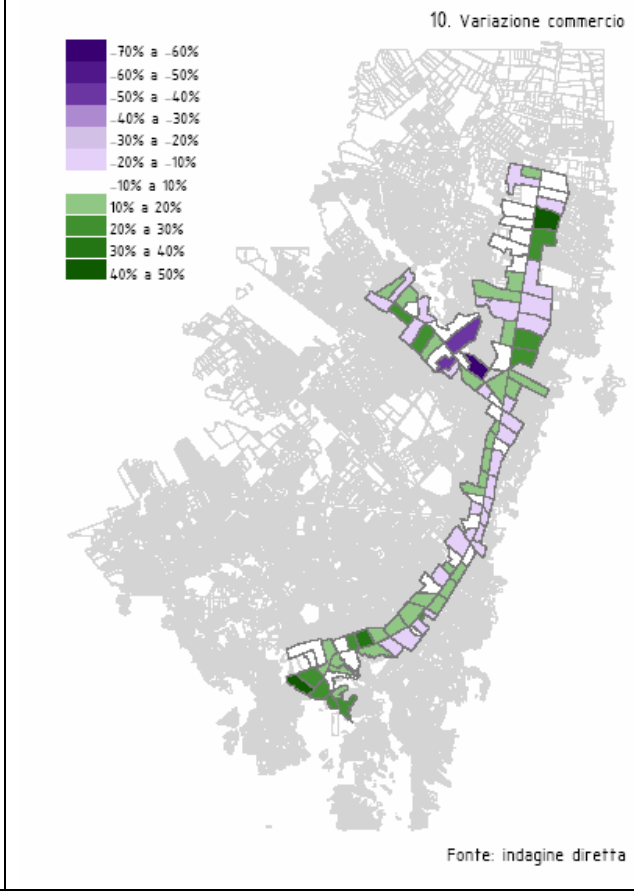
Comme le montre la carte 17, **si on adopte un regard macro-géographique, la substitution est significative.**

En 2000 le pourcentage de terrain occupé par des activités de commerce et de service était relativement faible le long du futur corridor Sud. Cette zone a connue durant la période « TransMilenio » une croissance importante du secteur tertiaire. Pour exemple, à Tunal, autour du portal (terminus) Sud du corridor BRT, la proportion d'activité tertiaire augmenta de 30% par rapport aux usages résidentiels des sols. Au Nord, entre les Calle 100 et 106, les usages du foncier pour le secteur tertiaire sont passés de 50% à 70% par rapport au résidentiel. De la même façon, le long de la Calle 80, certaines zones présentent des substitutions de l'ordre de 10%. Les cartes 16 et 17 montrent bien que **les croissances les plus fortes du pourcentage d'activités tertiaires par rapport aux résidences se situent dans les zones où les taux de commerce et de service étaient les plus faibles**.

Carte 16 : Pourcentage de commerce par rapport aux résidences



Carte 17 : Evolution du pourcentage de commerce par rapport aux résidences entre 2000 et 2003



Source : Grobbeiro, Robazza, 2005

Ainsi **les effets du TransMilenio sur la distribution spatiale des activités et résidences le long des corridors BRT ne sont pas homogènes** ; ils dépendent du niveau de consolidation de la zone, de la proportion activités/résidences antérieure à la construction du TransMilenio, de l'éloignement par rapport à la centralité axiale historique et de l'évolution des règlements d'urbanisme.

Ces substitutions des usages du sol résidentiels pour des usages tertiaires dans les différentes zones peuvent s'interpréter comme un **phénomène global de diffusion de la centralité historique**. Depuis la fondation de Bogota, le centre historique – autour de la place Bolivar puis le long de l'axe

« place Bolivar – Chapinero » - a polarisé la majeure partie des activités commerciales, tolérant quelques centres secondaires. De la même manière que le tramway au début du 20ème siècle, le TransMilenio rétablit l'accessibilité entre les différents centres urbains desservis par les artères viaires principales. **Le BRT restaure ainsi une continuité spatiale au sein de l'agglomération**.

B - *Evolution de la typologie des activités tertiaires le long des corridors BRT*

Reprenant la typologie des activités économiques établie par l'administration commerciale de Bogota, Grobbeiro et Robazza (Grobbeiro, Robazza, 2005) étudient l'évolution entre 2000 et 2003 des 11 catégories d'activités tertiaires présentes dans l'aire d'influence[93] du TransMilenio. Les résultats montrent que **les proportions des différentes activités tertiaires le long des corridors BRT furent significativement modifiées**. L'activité économique la plus représentée, le commerce de détail, passa de 19,5% en 2000 à 25,5% en 2003, prenant ainsi la première place auparavant occupée par les garages (vente et réparation de voiture) qui en 2003 n'occupent plus que la troisième position (-5,2%). Les hôtels et restaurants perdirent aussi de l'importance, passant de 16,5% en 2000 à 11,9% en 2004. Les services en communication doublèrent, passant de 2,3% à 4,4%. Les autres activités tertiaires sont relativement stables (Grobbeiro, Robazza, 2005).

La vente et la réparation d'automobile est donc l'activité la plus touchée par l'arrivée du TransMilenio. Comme le montre le tableau 48, les garages étaient particulièrement concentrés au centre et au sud. Il est possible que les artères du TransMilenio, où circule un flux important de piéton, soient plus adaptées à des activités où la visibilité joue un rôle essentiel dans l'activité commerciale. La pression économique de ces activités (plus rentables) pour obtenir une localisation le long des corridors a probablement chassé les garages vers d'autres zones. De plus, les garages nécessitent des aires de stationnement devant leurs locaux, aussi bien pour charger et décharger des pièces que pour réparer les voitures. Du fait de leur faible taille, ils n'ont pas eu les moyens d'aménager ces aires de stationnement et la récupération de l'espace public le long des artères TransMilenio interdit de stationner sur la voie. Il était donc préférable pour ces activités de se relocaliser ailleurs.

Les garages ont été remplacés par diverses activités : des commerces de détail (+7,8% dans le centre et +2,7% au Sud) et des activités de service social (communication, santé, éducation, sport) (+4,1% dans le centre).

La distribution spatiale des activités de commerce de détail est plus homogène. C'est au Nord qu'elles étaient le plus concentrées, du fait de la nature de centralité tertiaire et tertiaire supérieur consolidée de ce secteur. La plus forte croissance s'observe le long de l'artère Nord du TransMilenio (de 19,5% à 25,5%). Dans toutes les macro-zones, les commerces de détails augmentent mais avec une intensité plus forte au centre et au Sud.

Les hôtels et restaurants diminuent le long de toutes les artères TransMilenio. Moins rentables et moins dépendants de la visibilité, ils se relocalisent. Ce sont en majorité les petits restaurants (moins de 50 m2) qui restent.

[93] Ces auteurs considèrent une frange de 1 Km de part et d'autre du corridor (Grobbeiro, Robazza, 2005).

Tableau 48 : Evolution des proportions des trois principales activités tertiaires le long des corridors BRT

Vente et réparation automobile			
Corridor BRT	2000	2003	Variation
Sud	20,5%	12,3%	-8,2%
Centre	38,3%	22,7%	-15,6%
Nord	1,8%	1,2%	-0,7%
Ouest (Calle 80)	5,5%	3%	-2,5%
Total			**-5,2%**
Commerce de détail			
Corridor BRT	2000	2003	Variation
Sud	15,8%	18,5%	+2,7%
Centre	9,4%	17,2%	+7,8%
Nord	26%	31,8%	+5,8%
Ouest (Calle 80)	13,2%	18,9%	+5,7%
Total			**+6%**
Hôtel et restaurant			
Corridor BRT	2000	2003	Variation
Sud	12,7%	12%	-0,7%
Centre	14,3%	11,7%	-2,6%
Nord	16,8%	10,1%	-6,7%
Ouest (Calle 80)	23,8%	16,3%	-7,5%
Total			**-5%**

Source : Grobbeiro, Robazza, 2005

Ces résultats semblent indiquer d'une part que les activités spécifiquement dirigées vers un public réduit furent remplacées par des activités à la clientèle plus large et plus indifférenciée, d'autre part que les activités faiblement rentables furent substituées par des activités plus compétitives. Notons toutefois que les spécialisations de chaque zone n'ont en général pas été modifiées en si peu de temps.

C - *Conclusions*

Les observations de Grobbeiro et Robazza (Grobbeiro, Robazza, 2005) mettent en exergue une substitution des usages résidentiels pour des usages tertiaires le long des corridors BRT. **Cette substitution « résidence pour tertiaire » est d'une part proportionnelle à l'amélioration urbanistique apportée par le TransMilenio et d'autre part inversement proportionnelle aux prix fonciers et au degré de consolidation et de saturation en commerce et service de la zone.**

Ces substitutions peuvent s'interpréter comme un phénomène global de **diffusion de la centralité historique.**

L'évolution de la typologie semble indiquer **une intensification de la rentabilité de l'usage foncier le long des corridors**, ce qui est bien entendu à relier avec l'appréciation foncière et immobilière des zones d'influence du TransMilenio discutée précédemment.

IV - Effets du TransMilenio sur les périphéries de l'agglomération

Nous analysons dans cette troisième section les effets du BRT sur les périphéries de l'agglomération au travers de la distribution spatiale de la croissance démographique entre 1999 et 2004 que nous confrontons aux stratégies adoptées par les autorités en charge de la planification du développement urbain à l'échelle de l'agglomération de Bogota et de la région Cundinamarca. Nous nous appuyons enfin sur l'exemple de la conurbation de Soacha avec Bogota pour illustrer les risques de long terme d'un BRT pour l'étalement urbain.

A - *Distribution spatiale de la croissance démographique entre 1999 et 2004*

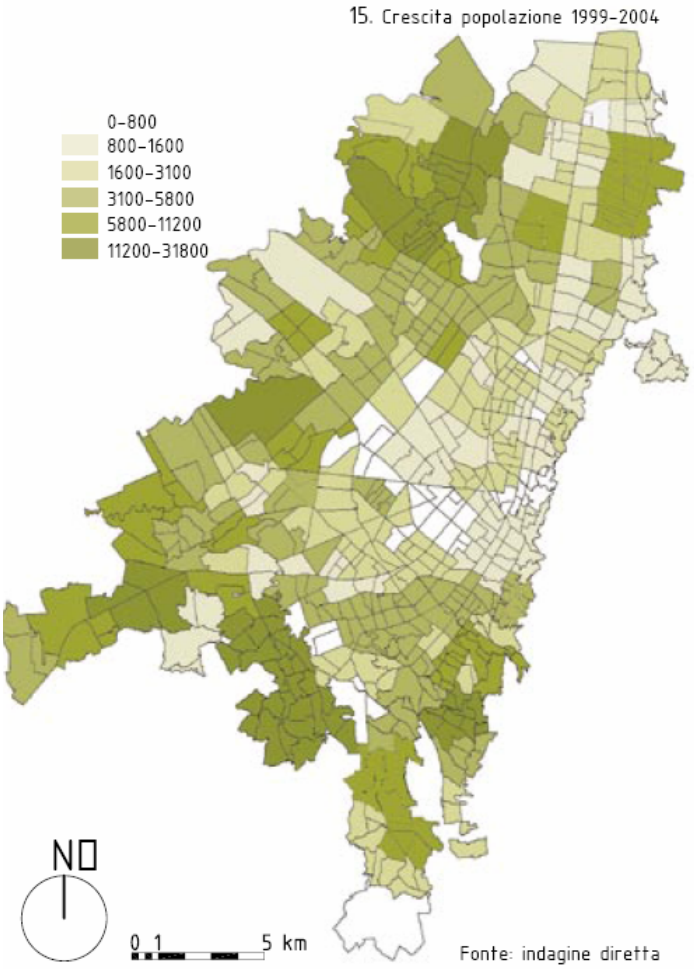
Grobbeiro et Robazza (Grobbeiro, Robazza, 2005) établirent à partir des données du DAPD une carte (carte 18) représentant la distribution spatiale de la croissance démographique entre 1999 et 2004.

Nous observons que la localisation de la croissance démographique entre 1999 et 2004 est particulièrement polarisée. La carte met en exergue des **anneaux concentriques d'accroissement démographique croissants autour de la centralité axiale historique**. Plus on s'éloigne de la centralité historique vers les périphéries plus la croissance démographique est importante. D'autre part cette croissance démographique est plus intense dans certaines zones : au Nord-Est dans la municipalité de Usaquen, au Nord-Ouest dans les municipalités des Engativa et Suba, au Sud dans les municipalités de Bosa, Ciudad Bolivar, Tunjuelito et Usme. Ces zones sont toutes desservies par le TransMilenio.

Cette polarisation de la croissance démographique entre 1999 et 2004 sur les périphéries peut s'expliquer d'une part par des prix fonciers et immobiliers plus accessibles et une moindre consolidation de ces zones ce qui permet des opérations immobilières d'une plus grande ampleur. D'autre part la polarisation plus forte sur certaines zones coïncidant avec le tracé du BRT semble être reliée à une amélioration de la mobilité permise par le TransMilenio.

Ainsi nous pouvons émettre l'hypothèse que **le TransMilenio joue un rôle inducteur du développement urbain vers certaines zones périphériques**.

Carte 18 : Distribution spatiale de la croissance démographique entre 1999 et 2004



Source : Grobbeiro, Robazza, 2005

B - *Décalage avec la planification urbaine*

L'agglomération de Bogota couvre une superficie de 30.100 hectares[94] au sein du périmètre officiel du district urbain (Alcadia Mayor de Santa Fe de Bogota, 2004). Le plan d'urbanisme à l'échelle du district de Bogota (Alcadia Mayor de Santa Fe de Bogota, 2004) et le plan de développement en cours d'élaboration au niveau de la région Cundinamarca (Mesa de Planificacion Regional Bogota-Cundinamarca, 2005) affichent des stratégies d'endiguement de l'étalement urbain pour éviter de renouveler avec les municipalités environnant Bogota, l'expérience d'une conurbation subie entre Soacha et Bogota. L'idée est premièrement de limiter les autorisations d'urbanisation aux aires aptes à la supporter et deuxièmement de consacrer plus de moyens au développement des municipalités voisines qui, mieux équipées, feraient contrepoids à l'attractivité de la ville-capitale. Ainsi, se basant sur une étude de la capacité des sols vacants au sein des limites officielles du district urbain, le POT définit 8400 hectares ouverts à l'urbanisation future. Ces zones prévues pour accueillir les urbanisations futures sont indiquées en orange dans la carte 18.

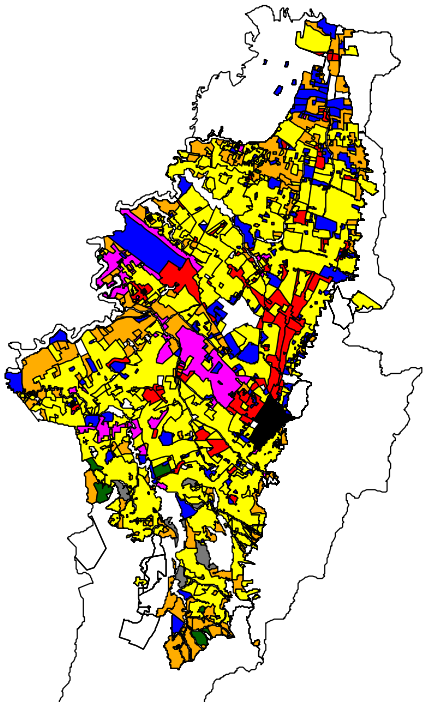
Nous avons vu dans le chapitre 3 que les promoteurs immobiliers légaux et illégaux ne respectent que très partiellement ces contraintes urbanistiques. De plus les limites naturelles – les pentes de la cordillère des Andes au Sud et à l'Ouest, et les zones humides aux abords de la rivière Bogota, les zones rurales au Nord et au Sud – ne sont pas des obstacles suffisants pour endiguer l'urbanisation spontanée, aussi bien des populations pauvres que riches (cf. chapitre 3 et photo 25).

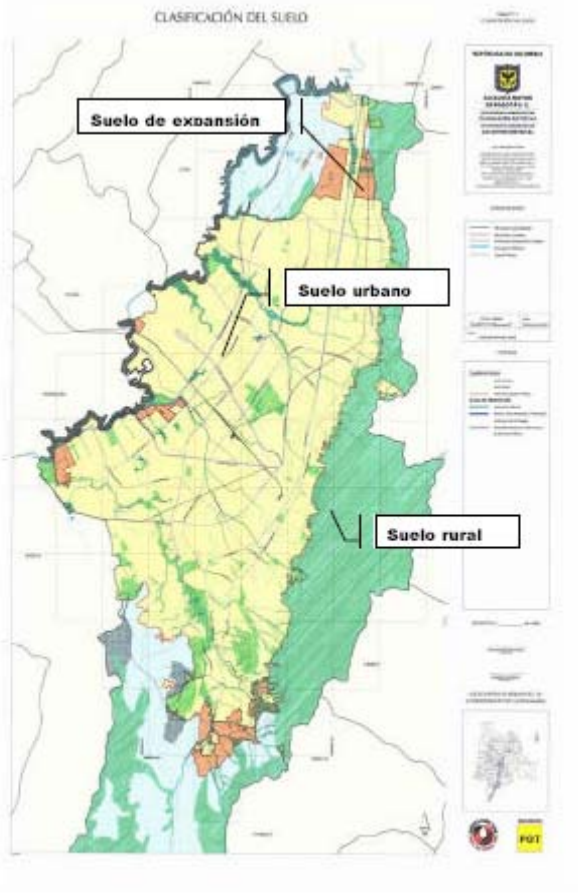
[94] Soit 72% de la superficie totale du district urbain de Bogota.

D'autre part les expériences de rééquilibrage régional du poids démographique d'une mégapole par création ex-nihilo de villes nouvelles ou par renforcement des localités périphériques existantes se sont généralement révélées très coûteuses et nécessitant un soutien institutionnel de long terme, notamment de la part de l'état central (chapitre 2).

Nous pouvons donc douter de la réussite de ces bonnes intentions affichées dans les documents de planification urbaine et régionale.

Carte 19 : Typologie des sols urbains dans le Plan d'urbanisme de Bogota. 2004





Fuente: DAPD

Aires résidentielles
Aires d'urbanisation future
Aires de dotations privées et publiques
Axes commerciaux
Centres commerciaux
Aires industrielles

Source : Alcadia Mayor de Santa Fe de Bogota, 2004

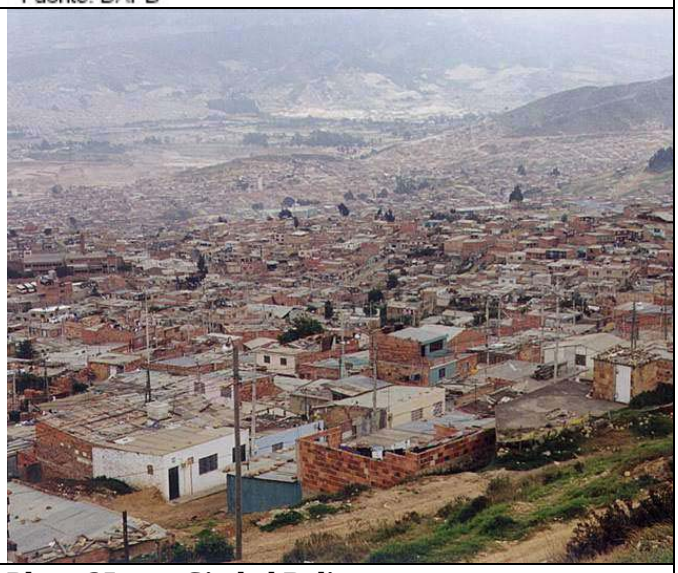


Photo 25 : Ciudad Bolivar

Il est d'ailleurs significatif que les projections pour 2010 présentées dans **le plan d'urbanisme (Alcadia Mayor de Santa Fe de Bogota, 2004) localisent massivement la croissance démographique dans les localités périphériques de l'agglomération de Bogota**. Le plan d'urbanisme prévoit ainsi que la croissance démographique se concentrera d'ici 2010 sur les huit localités des périphéries Sud, Ouest, Nord et Nord-Est de Bogota (tableau 49). Les pentes des Andes limiteraient l'installation des populations dans les localités périphériques Est et Sud Est. Le plan n'envisage aucune croissance démographique dans les localités déjà consolidées de Bogota, aussi bien au Nord, au centre que au Sud. La densification de ces zones consolidées serait nulle. Au contraire les zones périphériques accueillant les nouvelles populations se densifieraient massivement d'ici 2010. Elles présenteraient en moyenne des densités de population largement supérieures à celles projetées dans les zones plus centrales : les 10 localités périphériques accueillant la croissance démographique auraient une densité moyenne de 228 hab/ha alors que les 9 localités déjà consolidées resteraient avec une densité moyenne de 151 hab/ha, soit 34% moindre.

Tableau 49 : Projection de croissance de la population par localité.

Localité	Population 2005	Population 2010	Evolution Population %	Superficie ha	Densité 2005 (hab/ha)	Densité 2010 (hab/ha)	Evolution Densité %
Ciudad Bolivar	575.549	855.259	**49%**	2.088	276	409	48%
Bosa	410.099	585.237	**43%**	1.930	212	303	43%
Fontibon	278.755	384.053	**38%**	3.323	84	116	38%
Suba	706.535	954.504	**35%**	9.139	77	104	35%
Usme	244.270	323.571	**33%**	2.220	110	146	33%
Kennedy	912.780	1.090.004	**19%**	3.786	241	288	19%
Usaquen	425.000	504.700	**19%**	4.277	99	118	19%
Engativa	749.066	846.018	**13%**	3.612	207	234	13%
San Cristobal	455.028	470.355	**3%**	1.667	272	282	3%
Rafael Uribe	384.630	386.630	**1%**	1.345	286	287	1%
Chapinero	122.990	122.990	**0%**	1.349	91	91	0%
Santa Fe	107.044	107.044	**0%**	662	162	162	0%
Tunjuelito	204.367	204.367	**0%**	1.062	192	192	0%
Barrios Unidos	176.552	176.552	**0%**	1.190	148	148	0%
Teusaquillo	126.125	126.125	**0%**	1.419	89	89	0%
Los Martires	95.541	95.541	**0%**	650	147	147	0%
Antonio Narino	98.355	98.355	**0%**	493	200	200	0%
Puente Aranda	282.491	282.491	**0%**	1.723	164	164	0%
La Candelaria	27.450	27.450	**0%**	164	168	168	0%
Total	6.382.627	7.641.246	**20%**	42.099	151	181	20%

Source : Alcadia Mayor de Santa Fe de Bogota, 2004

Ces projections de densification forte des périphéries paraissent d'autant moins réalistes que Bogota est déjà une ville relativement dense (tableau 50). D'autre part la mobilité des citadins a été considérablement améliorée avec le TransMilenio et va l'être plus encore avec les extensions prévues. De fait, **les projections du POT amènent à craindre une forte croissance hors des limites de la ville, avec un étalement urbain en tâche d'huile.**

Tableau 50 : Comparaison de la densité de Bogota avec d'autres mégapoles

Ciudad	Area (Ha)	Población (Miles)	Densidad (Hab/Ha)	Observaciones
Bogotá	30.110	6.323.000	210	Area Desarrollada
Bogotá	36.232	6.323.000	176	Area nuevo perímetro POT.
México	149.900	10.316.000	69	Distrito Federal
Caracas	7.700	1.755.000	228	Ciudad de Caracas
Caracas	36.000	2.924.000	81	Area Metropolitana de Caracas
Buenos Aires (2)	19.500	2.965.000	155	Ciudad de Buenos Aires (Sin Gran Bs.As)
Santiago de Chile	34.200	4.086.000	119	Ciudad
Santiago de Chile	210.900	4.225.000	20	Area Metropolitana
París (1)	10500	2.200.000	210	París (dentro del periférico, sin la banlieu).
Barcelona (1)	9.800	1.600.000	163	Ciudad de Barcelona sin Area Metropolitana
Sao Paulo	79.670	13.588.000	16	Grande Sao Paulo
Shangai	34.000	6.881.000	202	Ciudad de Shangai
Hong-Kong	7.837	1.184.000	151	Ciudad de Hong-Kong
Hong-Kong A.M.	109.000	5.423.000	50	Area metropolitana de Hong-Kong.
Calcuta	10.400	3.305.000	318	Ciudad de Calcuta
Calcuta A.M.	145.000	9.166.000	63	Area Metropolitana de Calcuta

(1) Datos tomados de "Dinámica metropolitana del área metropolitana de Barcelona", 1995.
(2) Población 1991, tomada de "Plan Urbano Ambiental de la ciudad de Buenos Aires.", 1998.

Source : DAPD.SECI., 2005, Observatoire des dynamiques urbaines, Vol II.

C - *La conurbation entre Soacha et Bogota*

La conurbation[95] entre Soacha et Bogota illustre parfaitement les risques d'étalement urbain liés au projet TransMilenio.

L'autoroute Sud, voie principale qui relie Bogota à Soacha, a une longueur approximative de 5,9 km (de la limite administrative de Bogota au centre de Soacha). Environ 332.000 déplacements quotidiens s'effectuent sur cette voie, dont 73,4% en transport public. Aux heures de pointe de la matinée, l'autoroute Sud supporte 19.000 déplacements en direction de Bogota, ce qui est comparable au volume des corridors BRT construits[96]. Les destinations des trajets générés par Soacha sont relativement concentrées : le centre historique et le long de l'avenue Caracas. (CONPES 3185, 2002).

Le trafic quotidien est composé en moyenne de 60.800 véhicules, dont 39% sont des bus de transport collectif, 11% des camions, 39% des automobiles, 2,6% des bus inter-municipaux et 8,6% des taxis. La majorité des bus de transport collectifs (70%) sont des véhicules de très faibles capacités. D'un autre coté, la sur-offre de transport est estimée à environ 52%. Il y en effet 485.000 sièges offerts par jour, et seulement 240.000 sont occupés. (CONPES 3185, 2002)

La crise de la mobilité au sein de la conurbation de Soacha – Bogota est donc l'exacte réplique de ce que nous avons décrit pour l'agglomération de Bogota à la fin du 20ème siècle (chapitre 3.IV et 3.V) : inefficacité et inorganisation du système de transport public conduisant à une sur-offre de transport collectif et une forte congestion.

La réponse envisagée depuis 2002 par les autorités responsables, et actuellement en cours de planification (CONPES 3185, 2002 ; CONPES 3404, 2005) est dans la continuité de ce qui a été fait pour Bogota : prolonger le BRT TransMilenio jusqu'au cœur de Soacha. L'extension du corridor

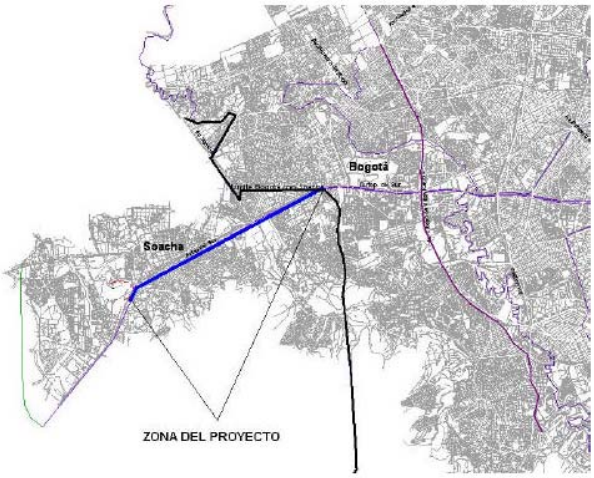
[95] Une conurbation est une agglomération formée par la réunion de plusieurs centres urbains initialement séparés par des espaces ruraux. (INSEE)

[96] Aux heures de pointe de la matinée, les volumes de passagers dans le TransMilenio sont de 19.000 pass/H sur la Calle 80, 12.000 pass/H sur l'autoroute Nord et 32.000 pass/H sur l'avenue Caracas (CONPES 3185, 2002).

Norte-Quito-Sur (NQS) jusqu'au centre de Soacha (carte 20) desservira l'ensemble de la population de Soacha qui sera alors situé à moins de 500 mètre du système TransMilenio principal ou d'une ligne d'alimentation. Si l'étalement urbain vers Soacha est antérieur au projet TransMilenio, nous comprenons que l'intégration de Soacha dans une conurbation avec Bogota sera achevée grâce au BRT. La tâche urbaine risque de s'épancher plus loin encore vers le Sud. Cela constituerait une fuite en avant, alimentée par des systèmes de mobilité toujours plus performants, dangereuse pour la soutenabilité urbaine, notamment la soutenabilité environnementale des transports urbains à Bogota.

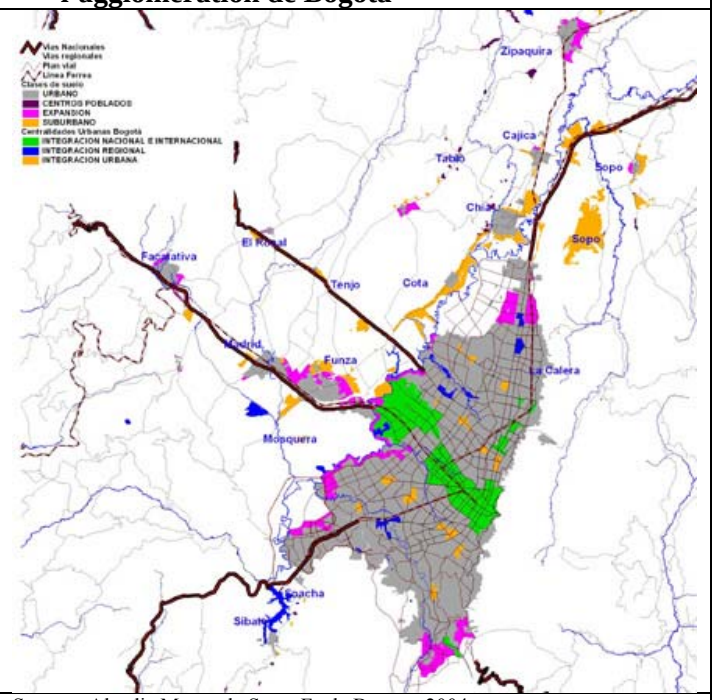
De plus ce phénomène de conurbation pourrait se répéter avec d'autres localités périphériques proches de l'agglomération de Bogota. La carte 21 met clairement en exergue les « municipalités candidates » à un étalement en tâche d'huile.

Carte 20 : Projet d'extension du corridor BRT jusqu'au cœur de Soacha



Source : CONPES 3404, 2005

Carte 21 : Urbanisation périphérique autour de l'agglomération de Bogota



Source : Alcadia Mayor de Santa Fe de Bogota, 2004

D - *Conclusions*

Les quartiers en périphérie de Bogota, souvent produits d'une expansion informelle, sont intégrés à la ville grâce aux corridors BRT et aux lignes de bus alimentant le TransMilenio. Le BRT renforce les centralités secondaires périphériques déjà existantes ou émergentes, et crée des connexions entre ces zones d'expansion et la centralité axiale historique. Les portal (terminus) situés en périphérie engendrent un développement commercial – des centres commerciaux importants ainsi que des petits commerces au rez-de-chaussée des maisons particulières ont fleuri autour de chaque terminus BRT - et par là renforce le développement résidentiel.

Les observations de Grobbeiro et Robazza (Grobbeiro, Robazza, 2005) confirment notre analyse empirique. Ces auteurs observent en effet que la localisation de la croissance démographique entre 1999 et 2004 est particulièrement polarisée. Leur carte représentant la distribution spatiale de cette croissance démographique entre 1999 et 2004 met en exergue des anneaux concentriques d'accroissement démographique croissant autour de la centralité axiale historique. Plus on s'éloigne de la centralité historique vers les périphéries plus la croissance démographique est importante.

Ainsi **le TransMilenio apparaît comme une force motrice de l'expansion urbaine vers les périphéries**.

Ces observations sont en contradiction avec les objectifs d'endiguement de l'étalement urbain assignés à la planification urbaine, tant au niveau régional que de l'agglomération. De fait, ces analyses nous amènent à craindre une forte croissance hors des limites de la ville, avec un étalement en tâche d'huile similaire à celui qui a donné naissance à la conurbation entre Soacha (Sud-Est) et Bogota.

V - Effets du TransMilenio sur le système de transport et la mobilité urbaine

Nous analysons dans cette section les effets du TransMilenio sur le système de transport et la mobilité urbaine.

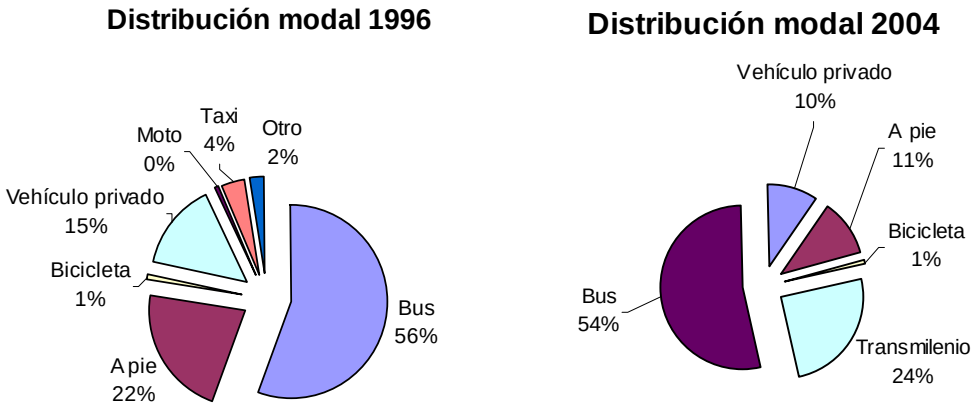
Notre objectif est d'identifier, de quantifier et de qualifier les effets du TransMilenio sur les modes, les distances, les durées et la matrice Origines – Destinations des déplacements réalisés par les habitants de Bogota.

Pour mener cette analyse, nous confrontons les données issues des enquêtes effectuées lors de l'élaboration des plans de transport urbain de 1996 (JICA, 1996) et de 2006 (Duarte, 2006). Nous avons en effet pu recueillir les matrices complètes des déplacements à Bogota établies en 1996 par JICA et en 2006 par le bureau d'étude Duarte, Guterman & Cia. Ces matrices nous renseignent sur le nombre de déplacements mais aussi sur le mode, l'origine, la destination, la durée, la distance et le motif de chaque déplacement enregistré.

A - *Evolution de la répartition modale des déplacements*

TransMilenio satisfait en 2004 24% des déplacements quotidiens (Tableau 51). **Les bus traditionnels restent le principal mode de transport**. Cela peut s'expliquer par deux raisons liées l'une à l'autre : beaucoup de kilomètres de corridors TransMilenio restent à construire et les corridors BRT actuellement en fonctionnement sont saturés, notamment aux heures de pointes. La voiture représente seulement 10% des déplacements ; et cela malgré le fait qu'elle constitue 80% du trafic motorisé (Duarte, 2006).

Tableau 51 : Evolution de la distribution modale des déplacements entre 1995 et 2004



source: JICA, 1996 ; Grobbeiro, Robazza, 2005

Tableau 52 : Nombre de passagers par mode de transport

Opérateur	1999	2002	Différence
Voiture	366.867	367.135	268
Taxi	48.068	43.640	-4.428
Bus courant	339.545	205.512	-134.033
Bus exécutif	306.830	274.671	-32.159
Buseta	462.609	423.730	-38.879
Colectivo	136.997	139.371	2.374
Total	1.660.916	1.454.059	-206.857
Bus TransMilenio d'alimentation	0	127.918	127.918
Bus TransMilenio courrant	0	128.408	128.408
Bus TransMilenio express	0	212.936	212.936
total		469.262	469.262

Source: Grobbeiro, Robazza, 2005, à partir de données du DAPD

Le tableau 52 montre la **forte compétitivité du TransMilenio face au système de bus traditionnel**. Cette compétitivité s'explique notamment par le fait que les artères TransMilenio sont situées sur les principaux corridors de déplacements d'où les bus traditionnels ont été retirés. Nous remarquons que l'usage de la voiture s'est maintenu en valeur absolue, seule sa proportion par rapport au total a diminué. Les passagers du TransMilenio sont pour l'essentiel des anciens usagers des bus traditionnels.

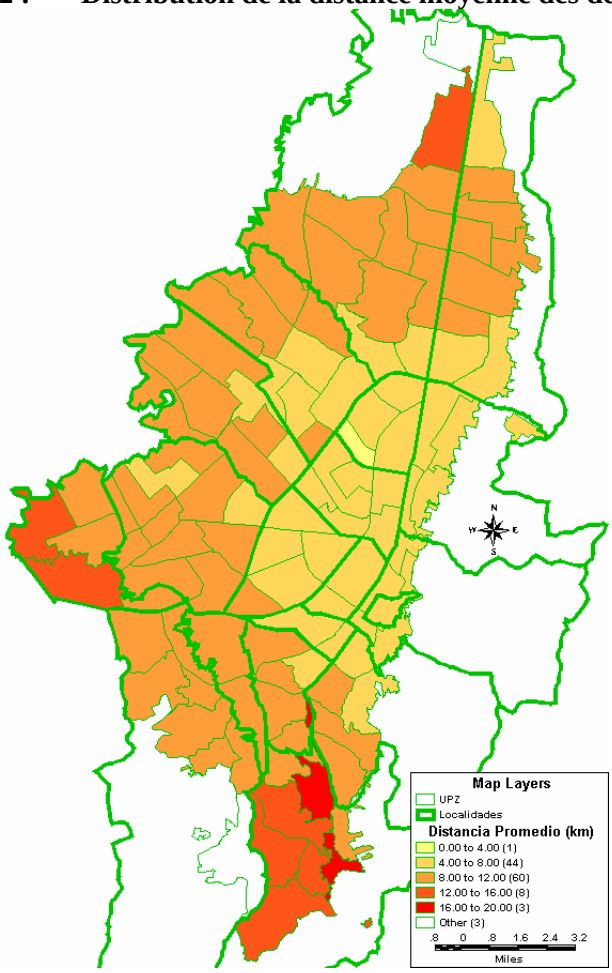
B - *Evolution de la distance des déplacements*

A partir des matrices Origine – Destination des déplacements de 1995 (JICA, 1996) et 2005 (Duarte, 2006), **nous calculons une augmentation de +27% de la distance moyenne des déplacements à Bogota.** En effet celle-ci passe de 7,27 km en 1995 à 9,25 km en 2005, soit un gain de 1,98 km en dix ans.

La carte 22 présente la répartition spatiale des distances moyennes de déplacement (à partir des lieux de résidences). Nous observons **une distribution croissante en anneau des distances moyennes de déplacement autour de la centralité constituée par le centre historique et son**

extension au Nord regroupant les activités tertiaires supérieures. Comme nous le verrons par la suite, cette distribution des distances moyennes est à relier avec la distribution monocentrique des déplacements convergents vers cette centralité étendue.

Carte 22 : Distribution de la distance moyenne des déplacements en 2005



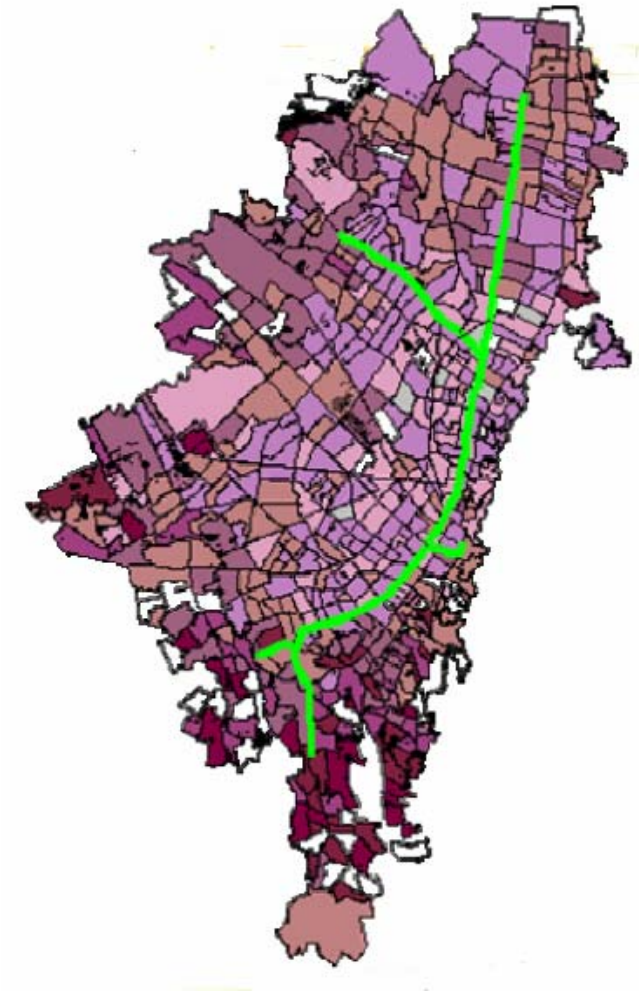
Source : Duarte, 2006

C - *Evolution de la durée des déplacements*

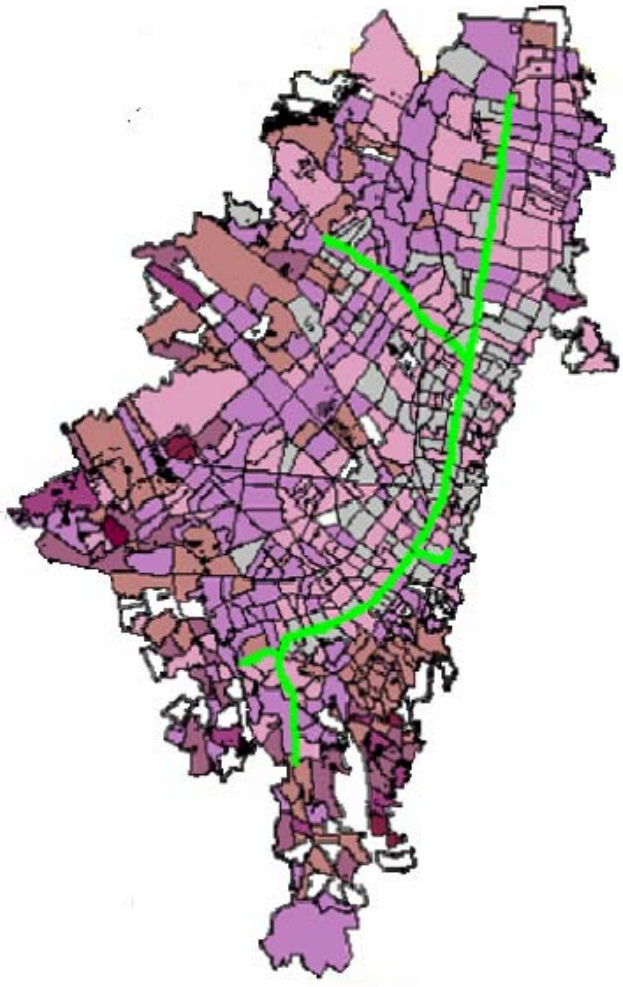
Le temps moyen d'un déplacement à Bogota est passé de 60 minutes en 1999 à 47 minutes en 2002 (STT, 2002). Cette diminution de 13 minutes représente donc un gain de 22% sur la durée moyenne d'un déplacement à Bogota.

Les cartes 23 et 24 présentent la répartition spatiale de ce gain de temps dans les transports. Nous observons que la distribution spatiale des gains de temps de temps est étroitement reliée au tracé de la première phase du TransMilenio.

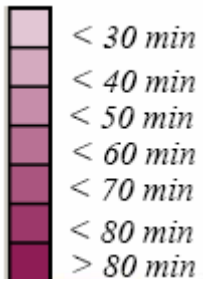
Carte 23 : Durée moyenne des déplacements 1999



Carte 24 : Durée moyenne des déplacements 2002

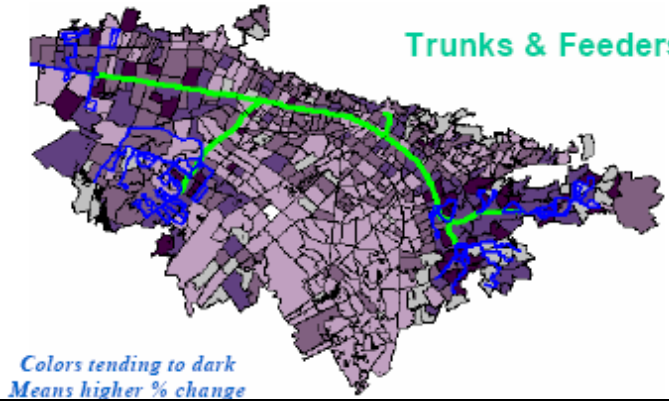


Légende



Carte 25 : Diminution des temps de déplacements entre 1999 et 2005

(Plus la couleur tend vers le sombre, plus la diminution du temps de déplacement est importante)

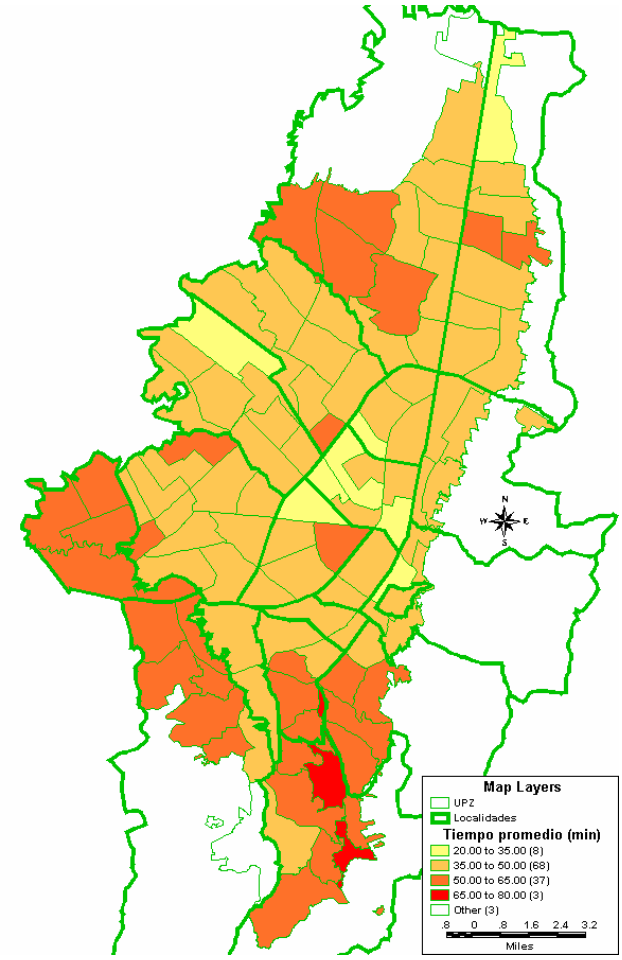


Source : Steer Davies Gleave 2000 ; Plan de Transport, Duarte, 2006

En 2006, lors de la présentation du nouveau plan de transport (Duarte, 2006), le bureau d'étude Duarte, le Secrétariat du Transport et Transit (STT) et TransMilenio S.A. avançaient une réduction du temps moyen des trajets à Bogota de 32% entre 1999 et 2005. **La réduction du temps moyen des déplacements à Bogota s'est donc accentuée depuis 2002.** La carte 25 montrent que **les gains de temps sont d'une part étroitement liés au tracé du TransMilenio et d'autre part plus importants**

dans les périphéries Nord, Ouest et Sud desservies par le BRT. La carte 26 indique les temps de transport moyen calculé part Duarte (Duarte, 2006) à partir de l'enquête de mobilité réalisée en 2005.

Carte 26 : Distribution spatiale des temps de déplacements en 2005



Source : Duarte, 2006

Ainsi **la carte des temps de déplacements, en regard des distances de déplacements, met en exergue le gain en terme de mobilité apporté par le TransMilenio dans les zones qu'il dessert.** Conformément aux conclusions de Zahavi (encadré 3), **ce gain de mobilité semble partiellement réinvesti dans une augmentation des distances de déplacements.**

D - *Evolution de la matrice Origine – Destination des déplacements*

Les cartes 27 et 28 présentent les distributions spatiales des générations et attractions des déplacements en 1995 (JICA, 1996 ; Carte 27) et 2005 (Duarte, 2006, Carte 28).

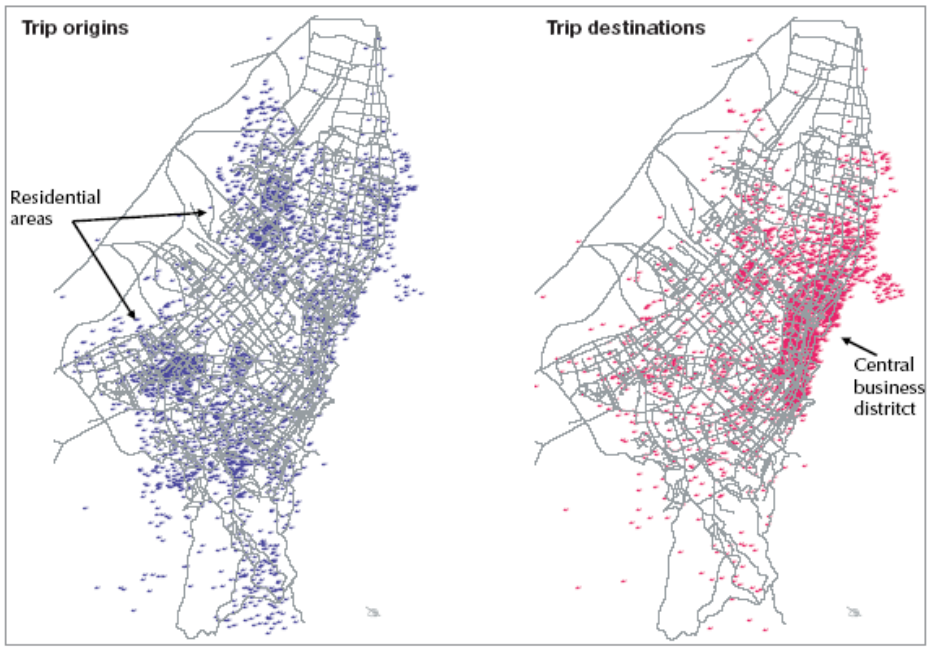
Nous observons que **la distribution spatiale des générations et attractions des déplacements n'a globalement pas évoluée entre 1995 et 2005**. Les zones générant des quantités importantes de déplacements se distribuent en arc de cercle autour d'un vide à l'Ouest formé par l'aéroport, la localité de Fontibon et le nord de la localité de Kennedy. Les zones attirant des quantités importantes de déplacements se concentrent principalement dans la centralité axiale historique composée des localités de la Candelaria, Santa Fé, Los Martires, Chapinero, Barrios Unidos et l'est de Teusaquillo (cf. Carte 29).

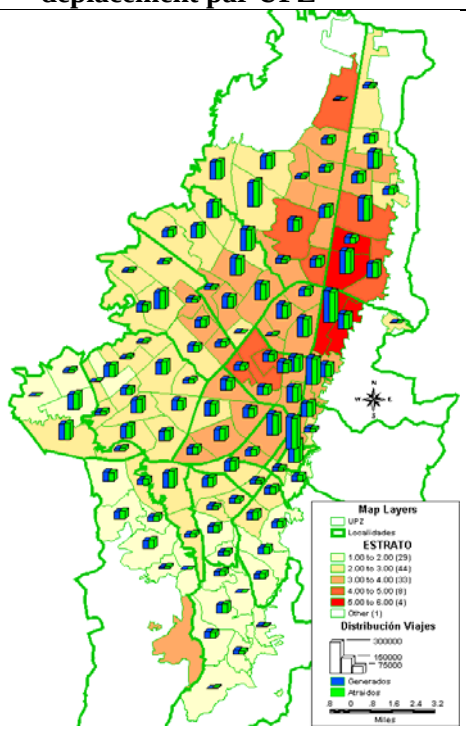
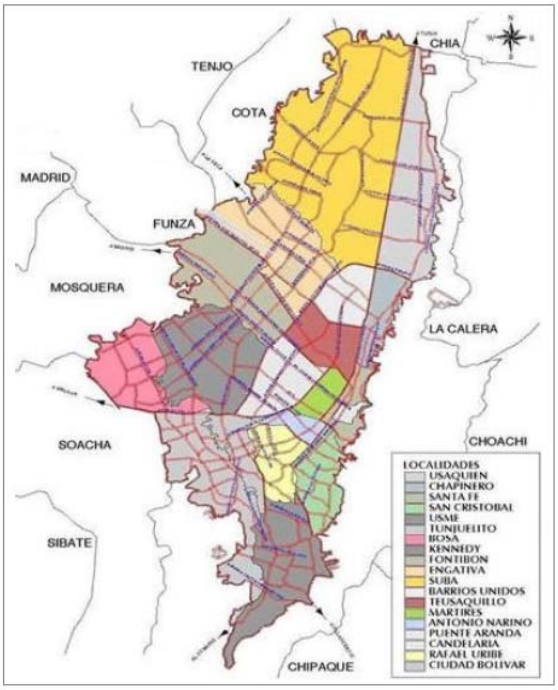
Toutefois la confrontation entre les deux distributions spatiales met en exergue **trois zones dont la force d'attraction des déplacements a augmenté entre 1995 et 2005** :

- au Nord-Ouest, la localité d'Engativa et le sud de la localité de Suba, le long du corridor BRT de la Calle 80 et autour des portal de la 80 et de Suba ;
- au Nord-Est, dans la localité d'Usaquen, le long corridor BRT de l'autoroute du Nord ;
- au Sud-Ouest, dans les localités des Bosa et Kennedy, autour du portal BRT de Las Americas.

L'accroissement de l'attractivité de ces trois secteurs suggère un effet significatif du TransMilenio sur la matrice des déplacements, notamment dans les périphéries desservies. Cette comparaison « à l'œil nu », à partir des cartes produites par les plans de transport de 1996 (JICA, 1996) et 2006 (Duarte, 2006), ne nous permet pas d'aller plus loin dans l'analyse des effets du TransMilenio sur la matrice Origine – Destination des déplacements à Bogota.

Carte 27 : Distribution spatiale des Origines et Destinations des déplacements. 1995



Carte 28 : Génération et attraction de déplacement par UPZ	Carte 29 : Les localités de Bogota
	 Fuente: DAPD
Source : STT, enquête de mobilité, 2006	Source : DAPD

Afin de mieux cerner l'évolution de la matrice Origine – Destination des déplacements et ses liens avec le TransMilenio nous avons réalisé trois séries de calcul sur les matrices Origine – Destination produites en 1995 (JICA, 1996) et 2005 (Duarte, 2006) à partir d'enquêtes ménage.

Nous avons calculé pour chaque zone de destination et pour chaque motif (« aller travailler ou étudier » et « retour au logement ») l'évolution du nombre de déplacements quotidiens entre 1995 et 2005. Ce qui nous permet de saisir *la traduction dans la matrice Origine – Destination de l'évolution de la distribution spatiale des résidences et activités*.

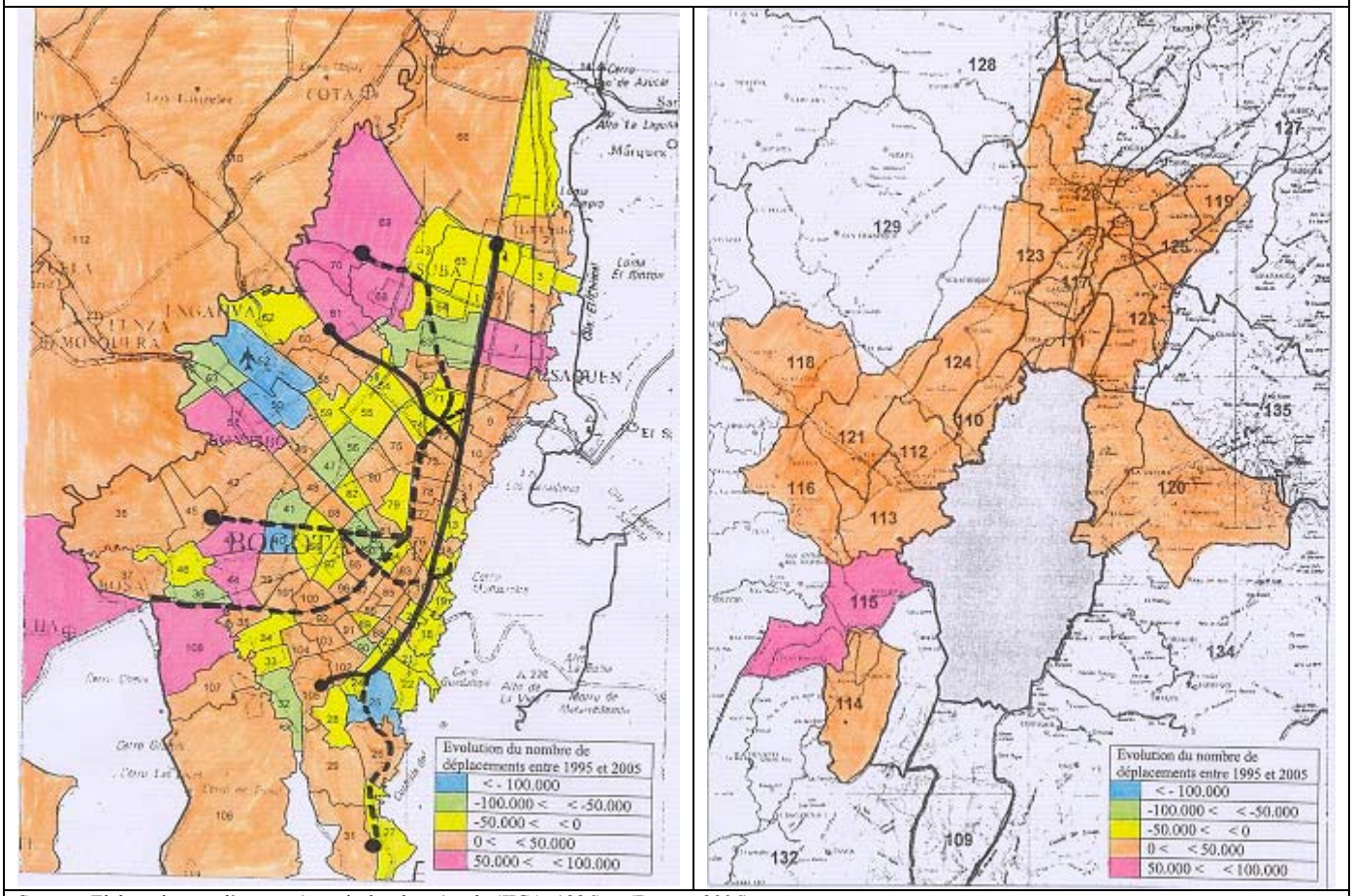
Nous avons ensuite calculé pour chaque zone l'évolution du nombre de déplacements quotidiens ayant pour origine cette zone, sans prendre en compte ni le motif ni la destination du déplacement. Ce qui nous permet de saisir *la traduction dans la matrice Origine – Destination de l'évolution de la concentration des fonctions urbaines dans chaque zone, et donc l'attractivité zonale pour les investissements*, quelque soit l'usage du sol envisagé.

La matrice de 2005 fut élaborée avec un zonage de l'agglomération plus fin que celui de 1995. Le bureau d'étude Duarte, Guterman & Cie, en charge du plan de transport a toutefois établit les correspondances entre ces deux découpages de la ville. Nous avons donc pu calculer les évolutions zone par zone. Certaines municipalités périphériques à l'agglomération de Bogota ne sont pas informées dans l'enquête menée par le STT en 2005 ; aussi nous n'avons pu les inclure dans notre étude. Nous laissons donc ces zones vierges dans les représentations graphiques. Les annexes 3 présentent le zonage de l'agglomération effectué par JICA que nous reprenons.

Nous avons dans un premier temps calculé pour chaque zone de destination et pour le motif « retour au logement » l'évolution du nombre de déplacements quotidiens entre 1995 et 2005. Nous mesurons ainsi la traduction dans la matrice Origine – Destination de *l'évolution de la distribution spatiale des résidences.*

Nous représentons ces évolutions dans les cartes 30.

Carte 30 : Evolution du nombre de déplacements quotidiens ayant pour motif « retours au logement » entre 1995 et 2005



Source : Elaboration par l'auteur, à partir des données de (JICA, 1996) et (Duarte, 2006)
Note : Les corridors BRT sont indiqués en noir continu pour ceux de la première phase, en noir pointillé pour ceux de la seconde phase.

Sur l'ensemble de l'agglomération de Bogota et des ses municipalités périphériques, les écarts entre 1995 et 2005 dans le nombre de déplacements par zone de destination et ayant pour motif le retour au logement s'échelonnent entre -135.377 et +93.752 déplacements quotidiens.

Nous observons une augmentation du nombre de destination ayant pour motif le retour au logement :

- dans trois zones du centre historique : les zones 13, 15, 19.
- autour du centre historique :
  - au Nord, dans la localité de Chapinero (zones 9, 10, 11) et la partie Sud de la localité d'Usaquen (zones 5, 6, 7)
  - à l'Ouest, dans les localités de Barrios Unidos et de Teusaquillo
- sur un axe Sud-Ouest, partant du centre historique et allant jusqu'à Ciudad Bolivar. Cet axe regroupe les localités de Los Martires, de Antonio Narino, de Rafael Uribe et Ciudad Bolivar. Il n'est interrompu que par la localité de Tunjuelito (zones de 32 à 34)
- dans les zones les plus périphériques de l'agglomération desservies par le TransMilenio :
  - au Sud, dans les localités de Usme, de Ciudad Bolivar, de Bosa et de Kennedy.
  - au Nord-Ouest, dans les parties les plus périphériques des localités de Engativa et Suba.
- au Sud-Ouest, dans la localité périphérique de Fontibon (zones 49 et 51)
- dans toutes les municipalités périphériques, hors des limites de la ville. L'intensification est particulièrement forte dans la municipalité de Soacha, dans le prolongement Sud du corridor BRT.

Au contraire nous observons une diminution du nombre de destination ayant pour motif le retour au logement :

- dans le centre historique, regroupant les localités de La Candelaria (zones 20), Santa Fe (zones 14 à 18) et le sud de Chapinero (zones 12). Seules les zones 13, 15 et 19 connaissent une augmentation.
- au sud du centre historique, dans la localité de San Cristobal (zones 21 à 25).
- sur un arc de cercle partant du Nord de la localité de Usaquen (zones 1, 3 et 4) et la partie Est de Suba (zones 65, 64, 63), descendant jusqu'à la frontière entre les localités de Kennedy et Puente Aranda (zones 40, 41, 97, 99).
- dans la zone ouest, autour de l'aéroport.

Enfin, nous remarquons que toutes les zones situées autour des terminus BRT sont des zones de destination où les déplacements pour motif « le retour au logement » ont augmenté. Par contre les évolutions dans les zones situées le long des corridors varient :

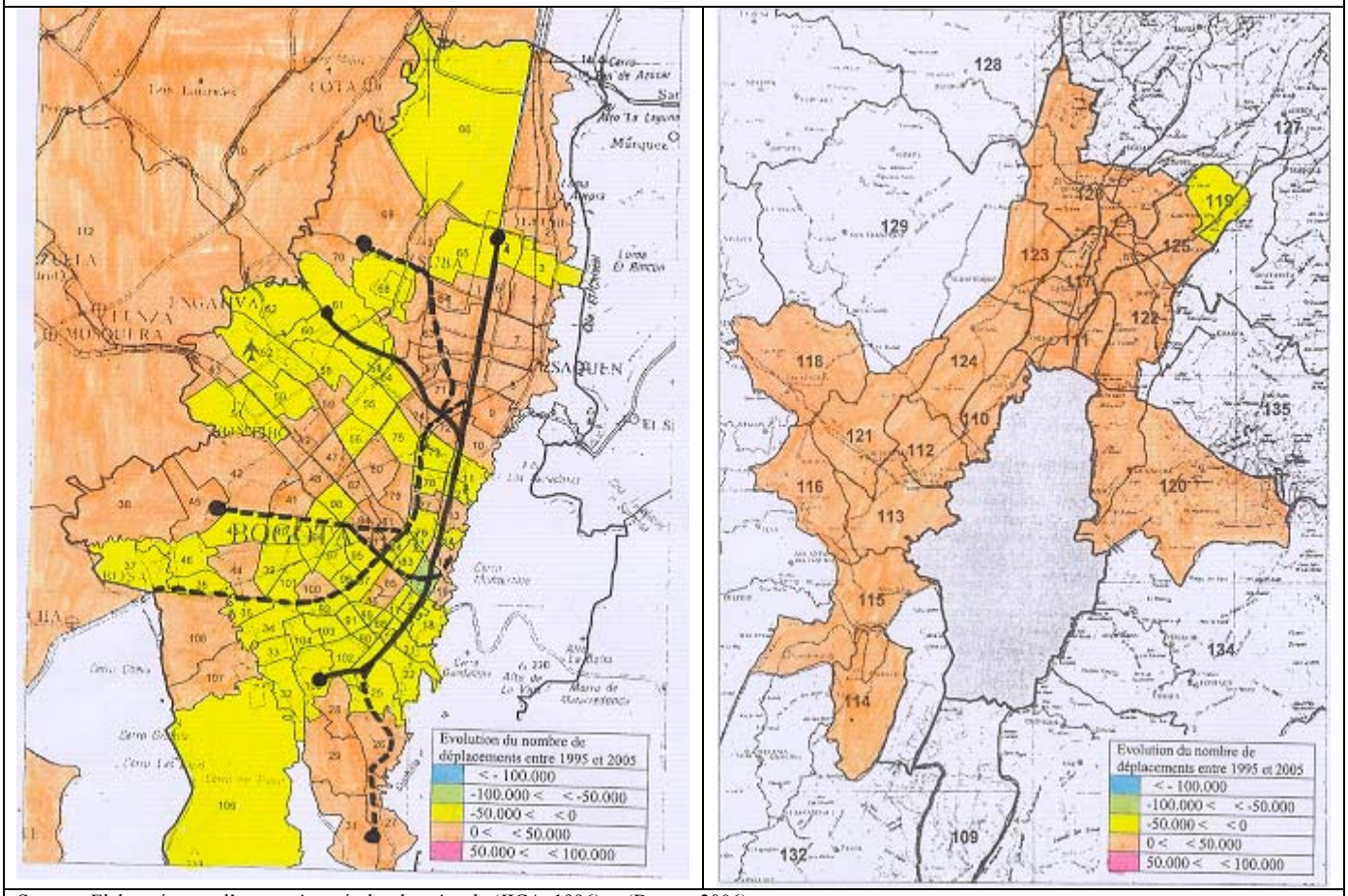
- positive pour les zones à l'ouest du corridor de l'Autoroute du Nord, négative pour celles à l'est,
- négative pour les zones situées le long du corridor de Suba et au début de celui de la Calle 80,
- positive pour les zones situées entre le corridor de l'avenue Caracas et celui NQS
- positive pour les zones à l'est puis au nord du corridor NQS,
- négative pour les zones situées le long du corridor de l'avenue Caracas puis Autoroute Sud,
- négative le long du corridor de Las Americas.

Nous pouvons retenir de cette première analyse des évolutions de la matrice Origine – Destination entre 1995 et 2005 que **la fonction résidentielle du centre historique, de l'Ouest de Bogota et de la première couronne au Nord-Ouest, Sud-Ouest et Sud diminue** alors que **à l'inverse le nombre de résidences situées au Nord du centre historique, dans la seconde couronne au Nord-Ouest, Sud-Ouest et Sud, dans toutes les zones situées autour des terminus du BRT et les périphéries de Bogota augmente.**

Dans un second temps nous avons calculé pour chaque zone de destination et pour le motif « aller travailler ou étudier » l'évolution du nombre de déplacements entre 1995 et 2005. Nous mesurons ainsi la traduction dans la matrice Origine – Destination de *l'évolution de la distribution spatiale des emplois (et des établissements scolaires)*.

Nous représentons ces évolutions dans les cartes 31.

Carte 31 : Evolution du nombre de déplacements quotidiens ayant pour motif « aller travailler ou étudier » entre 1995 et 2005



Source : Elaboration par l'auteur, à partir des données de (JICA, 1996) et (Duarte, 2006)
Note : Les corridors BRT sont indiqués en noir continu pour ceux de la première phase, en noir pointillé pour ceux de la seconde phase.

Nous observons que les évolutions sont moins importantes que dans l'étude précédente. Les différences entre 1995 et 2005 s'échelonnent entre -65.038 et +25.238 déplacements quotidiens.

Les zones dont le nombre de déplacements attirés ayant pour motif « aller travailler ou étudier » a augmenté sont :

- l'axe centre – Ouest formé par la localité de Teusaquillo (zones 77 à 82), l'est de la localité de Fontibon (zones 47 à 49) jusqu'à la localité de Kennedy.
- au nord du centre historique, la localité d'Usaquen, le Sud-Est de la localité de Suba et le Nord de Barrios Unidos.
- les zones les plus périphériques de l'agglomération desservies par le TransMilenio :
  - au Sud, dans la localité de Usme
  - au Sud-Ouest, autour des portal de Las Americas et del Sur, dans les parties les plus périphériques des localités de Ciudad Bolivar, de Bosa et de Kennedy.
  - au Nord-Ouest, autour du portal de Suba.
- toutes les municipalités périphériques, hors des limites de la ville.

Nous remarquons d'autre part que les zones situées autour des terminus BRT sont des zones de destination où les déplacements pour le motif « aller travailler ou étudier » ont augmenté. Par contre les évolutions dans les zones situées le long des corridors varient :

- au Nord, les évolutions sont généralement positive : le long des corridors de l'Autoroute du Nord, de Suba et au début de celui de la Calle 80,

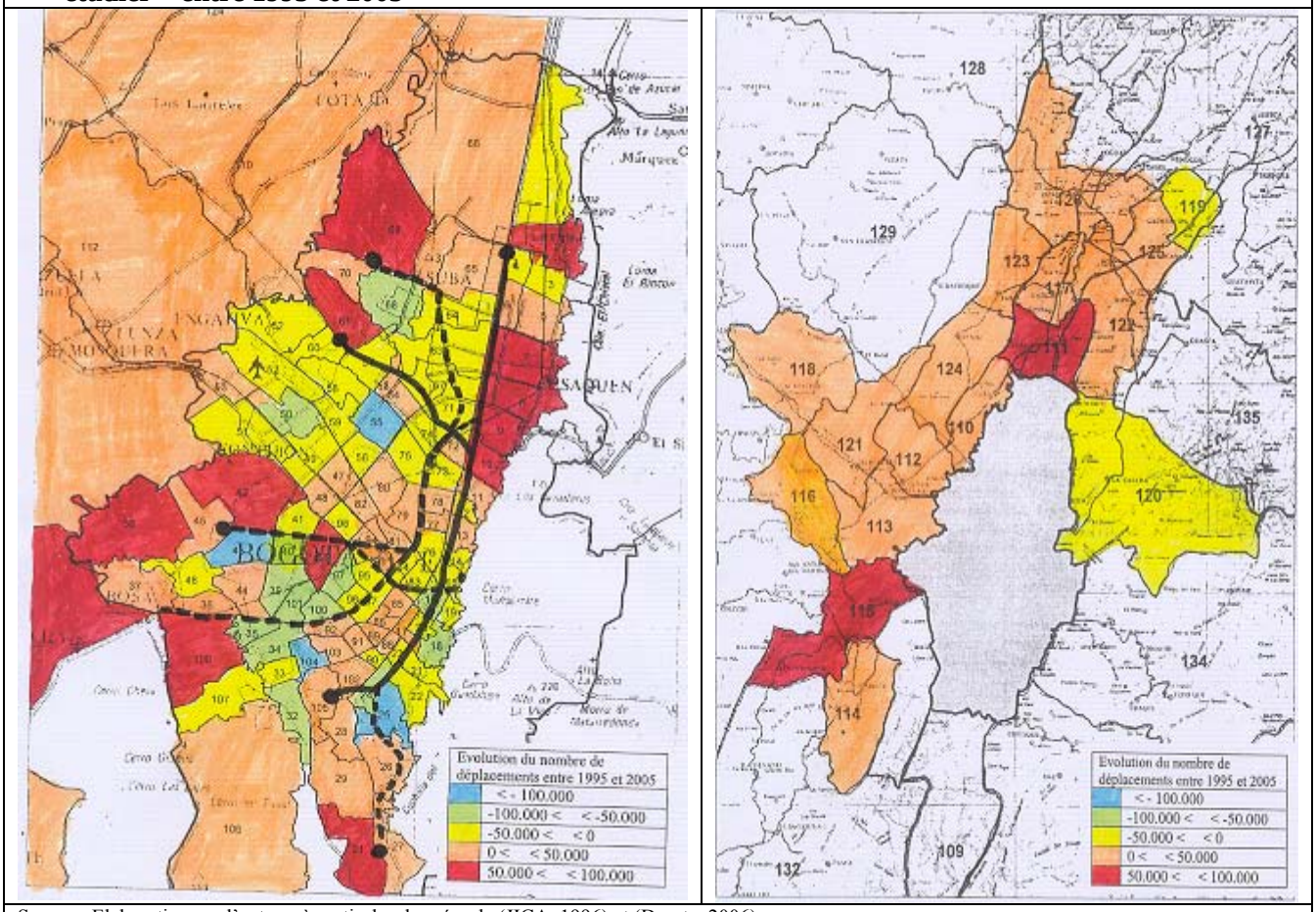
- au Sud, les évolutions sont généralement négatives : le long des corridors de l'avenue Caracas, NQS (sauf à l'ouest de sa portion centrale), de l'Autoroute Sud et de Las Americas (sauf dans sa partie proche du centre historique).

Nous pouvons retenir de cette deuxième analyse des évolutions de la matrice Origine – Destination entre 1995 et 2005 que **les fonctions de travail et d'étude diminuent dans les zones du centre historique non-desservies par le BRT, dans les zones de la première couronne au Nord-Ouest, Sud-Ouest et Sud et autour de l'aéroport, alors qu'elles augmentent dans les zones du centre historique desservies par le TransMilenio, au Nord du centre historique, dans toutes les zones situées autour des terminus du BRT et les périphéries de Bogota**.

Enfin nous avons calculé pour chaque zone l'évolution du nombre de déplacements ayant pour origine cette zone, sans prendre en compte ni le motif ni la destination du déplacement. La matrice étant construite pour les déplacements journaliers (sur 24H), la zone de destination du premier déplacement devient la zone d'origine du second déplacement, et ainsi de suite jusqu'à ce que l'individu retourne à sa résidence, la première origine. Ce dernier calcul nous renseigne donc sur l'évolution des localisations des couples « Origine – Destination », ce qui peut être rapproché de la densité « résidence + emploi + scolaire ». Nous mesurons ainsi la traduction dans la matrice Origine – Destination de l'évolution de la *concentration des fonctions urbaines dans chaque zone*. Nous considérons cette mesure comme un signal de l'attractivité zonale pour les investissements, quelque soit l'usage du sol envisagé.

Nous représentons ces évolutions dans les cartes 32.

Carte 32 : Evolution du nombre de déplacements quotidiens ayant pour motif « aller travailler ou étudier » entre 1995 et 2005



Source : Elaboration par l'auteur, à partir des données de (JICA, 1996) et (Duarte, 2006)
Note : Les corridors BRT sont indiqués en noir continu pour ceux de la première phase, en noir pointillé pour ceux de la seconde phase.

Nous observons une intensification de la concentration des fonctions urbaines

- autour du centre historique :
    - particulièrement au Nord du centre historique : dans la partie nord de la localité de Chapinero (zones 9, 10, 11) et la partie sud de la localité d'Usaquen (zones 5, 6, 7)
    - mais aussi à l'Ouest, dans la localité de Teusaquillo (zones 77 à 82) et dans la partie est de Fontibon (zones 47 et 48).
    - et au Sud-Ouest, dans la partie Sud de la localité de Los Martires (zones 85 à 87), dans les localités d'Antonio Narino et Rafael Uribe.
- dans les zones les plus périphériques de l'agglomération desservies par le TransMilenio : au Sud et Sud-Ouest dans les localités de Usme, de Ciudad Bolivar, de Bosa, et à l'Ouest de la localité de Kennedy (zones 42 et 45) ; au Nord-Ouest dans les parties Nord des localités de Suba et Engativa.
- dans toutes les municipalités périphériques, hors des limites de la ville. L'intensification est particulièrement forte dans les municipalités de Soacha et de Chia, c'est-à-dire dans les prolongements respectivement Sud et Nord du corridor BRT. Seule la municipalité de La Calera au Nord-Est perd des fonctions urbaines.
- la zone 99, alors que le nombre de déplacements s'y dirigeant pour les motifs précédemment étudiés diminue. Située au croisement de deux grandes avenues, l'avenue 68 et Las Americas (corridor BRT), la zone 99 s'est en effet affirmée ces dix dernières années comme un pôle de commerce et service (regroupement de grands centres commerciaux) pour le sud de la ville.

Au contraire nous observons une diminution de la concentration des fonctions urbaines

- dans le centre historique, regroupant les localités de La Candelaria, Santa Fe et le sud de Chapinero (zones12 et 13).
- au sud du centre historique, dans la localité de San Cristobal (zones 21 à 25)
- dans l'Ouest de la ville, à partir du bord Ouest du corridor BRT de l'Autoroute Nord jusqu'aux zones entourant l'aéroport.
- sur un arc de cercle partant du centre historique et du Nord de la localité de Los Martires (zones 83 et 84), passant par Puente Aranda (zones 96 à 101) et descendant jusqu'à la localité de Tunjuelito (zones 32 à 35) et le centre le Ciudad Bolivar (zone 107)
- dans la municipalité périphérique de la Calera au Nord-Est (zone 120). Le fait que La Calera soit la seule municipalité périphérique à voir son couple « origine + destination » diminuer pourrait s'expliquer par le fait que la route reliant La Calera à Bogota entre dans la ville par le CBD et est fortement congestionnée.

Enfin nous remarquons que toutes les zones situées autour des terminus BRT sont des zones connaissant une intensification de la concentration en fonction urbaine. Par contre, les évolutions dans les zones situées le long des corridors varient :

- positive pour les zones situées à l'ouest du corridor de l'Autoroute du Nord, négative pour celles à l'est,
- négatives pour les zones situées le long du corridor de Suba et au début de celui de la Calle 80,
- positive pour les zones situées entre le corridor de l'avenue Caracas et celui NQS
- négative pour les zones à l'est puis au nord du corridor NQS,
- négative pour les zones situées le long du corridor de l'avenue Caracas puis Autoroute Sud,
- négative le long du corridor de Las Americas.

Nous pouvons retenir de cette troisième analyse des évolutions de la matrice Origine – Destination entre 1995 et 2005 que **la concentration des fonctions urbaines diminue dans et au Sud du centre historique, dans les zones de la première couronne au Nord-Ouest, Sud-Ouest et Sud et autour de l'aéroport, alors qu'elle augmentent au Nord et à l'Ouest du centre historique, dans toutes les zones situées autour des terminus du BRT et les périphéries de Bogota**.

L'évolution tendancielle de la distribution spatiale des déplacements est complexe mais globalement nous pouvons tirer certaines conclusions de l'analyse des évolutions de la matrice Origine – Destination entre 1995 et 2005.

Le centre historique, regroupant les localités de Santa Fe (zones 14 à 18), La Candelaria (zones 19 et 20) et le sud de Chapinero (zones12 et 13) **voit sa concentration en fonctions urbaines diminuer.** Il concentre moins de couple « origine + destination » en 2005 qu'en 1995. Il est la destination d'un nombre moins important de déplacements se rendant aussi bien au « travail + étude » que « au logement ». Le nombre de déplacements ayant pour motif « travail + étude » n'augmente que dans les zones de destination desservies par le TransMilenio (zones 15 et 19, Eje Ambiental).

Au nord du centre historique, Chapinero et la moitié Sud d'Usaquen connaissent au contraire une augmentation de la concentration en fonction urbaine. Ces aires urbaines concentrent plus de couple « origine + destination » en 2005 qu'en 1995. Elles sont la destination d'un nombre plus important de déplacements se rendant aussi bien au « travail + étude » que « au logement ». Leur attractivité a augmenté. Au contraire dans la partie nord d'Usaquen, sauf pour la zone accueillant le terminus Nord du TransMilenio, les observations s'inversent.

La partie Ouest de la ville, vers et autour de l'aéroport, **concentre moins de fonctions urbaines en 2005 qu'en 1995.** Elle concentre moins de couple « origine + destination » en 2005 qu'en 1995. Elle est la destination d'un nombre moins important de déplacements se rendant aussi bien au « travail + étude » que « au logement ». **L'attractivité des ces zones non desservies par le TransMilenio a diminué.**

Au Nord-Ouest, au Sud-Ouest et au Sud, c'est-à-dire dans les aires urbaines impactées par les terminus du TransMilenio, la concentration en fonction urbaine diminue dans la première couronne et augmente dans la seconde. Ainsi sur l'ensemble de l'agglomération, la première couronne autour du centre concentre globalement moins de couple « origine + destination » en 2005 qu'en 1995. Elle est la destination d'un nombre moins important de déplacement se rendant aussi bien au « travail + étude » que « au logement ». Les observations s'inversent dans la seconde couronne, en périphérie de la ville. Globalement les périphéries concentrent plus de couple « origine + destination » en 2005 que en 1995 et sont la destination d'un nombre plus important de déplacements se rendant aussi bien au « travail + étude » que « au logement ».Leur attractivité a augmenté.

Cinq aires urbaines viennent troubler ce schéma simplifié :

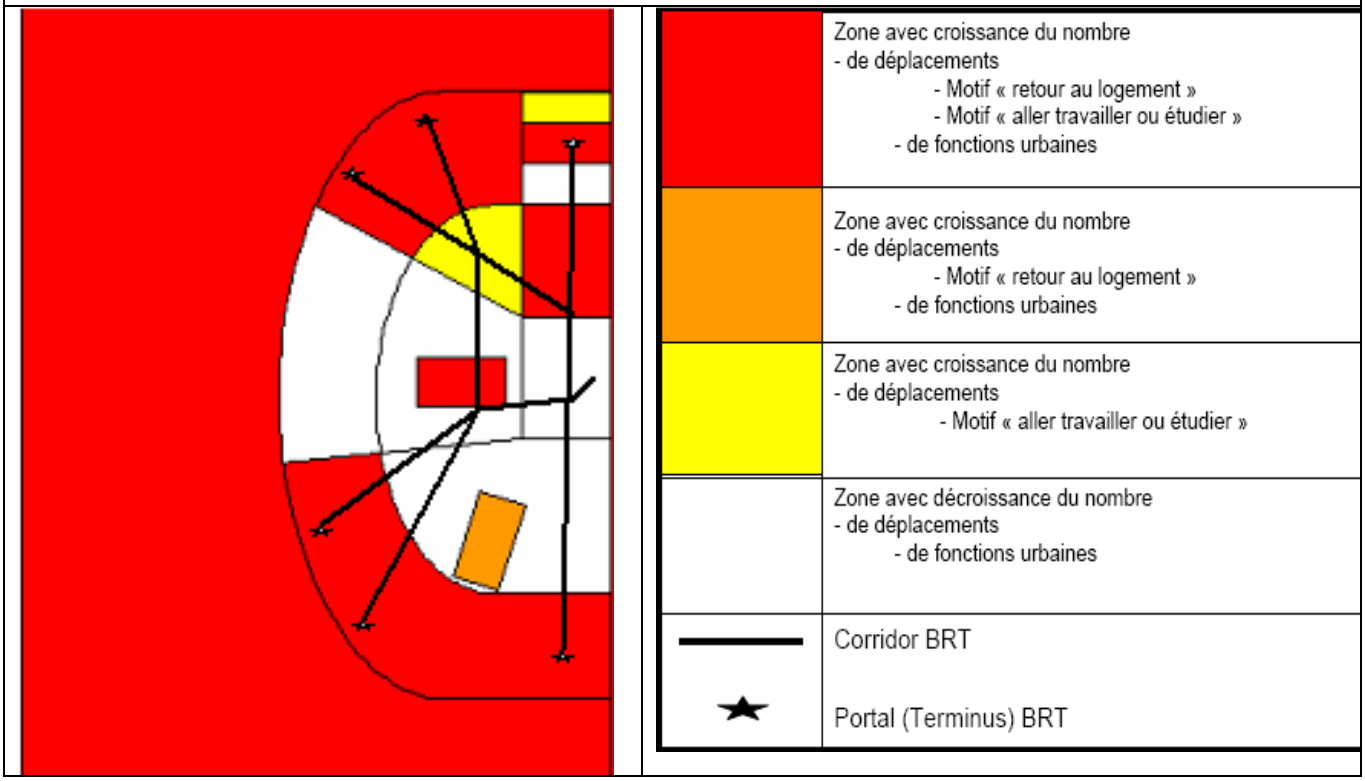
- la zone 1, à l'extrême Nord de la localité d'Usaquen, est la destination d'un nombre plus important de déplacement se rendant au « travail + étude »
- la zone 2 appartenant à la localité d'Usaquen et accueillant le terminus du corridor Nord du BRT : à l'inverse des zones 1, 3 et 4 l'environnant, la zone 2 concentre plus de couple « origine + destination » en 2005 que en 1995 et est la destination d'un nombre plus important de déplacements se rendant aussi bien au « travail + étude » que « au logement ».
- l'aire urbaine située dans et au Nord-Ouest du croisement des corridors BRT de Las Americas, NQS : elle concentre plus de couple « origine + destination » en 2005 que en 1995 et est la destination d'un nombre plus important de déplacements se rendant aussi bien au « travail + étude » que « au logement ».
- le Nord Ouest de la première couronne (zones 64, 63, 67, 71 74 et 72) : cette aire est la destination d'un nombre plus important de déplacements se rendant au « travail + étude »
- la bande située dans la première couronne, entre les corridors BRT NQS et de l'Autoroute Sud, au sud du corridor de Las Americas reliant l'avenue Caracas à la NQS, est la destination d'un nombre plus important de déplacements se rendant « au logement » et concentre plus de couple « origine + destination » en 2005 que en 1995.

Ces observations mettent en exergue d'une part **un phénomène de polarisation des origines et destinations des déplacements** et d'autre part des **évolutions dans la distribution spatiale de ces déplacements** :

- le ***glissement vers le Nord et le Sud-Ouest de l'attractivité de la centralité primale***, glissement que nous pouvons relier au phénomène de diffusion de la centralité historique le long des corridors BRT analysée précédemment ;
- la ***perte d'attractivité de la première couronne autour de la centralité axiale historique*** ;
- ***l'augmentation de l'attractivité de la seconde couronne desservie par le BRT*** (c'est-à-dire sauf la périphérie Ouest de la ville) ***et des municipalités périphériques.***

Ces observations sont résumées dans le graphe 41.

Graphe 41 : Représentation schématique de l'évolution de la matrice Origines – Destinations à Bogota 1996 - 2006



Source : Elaboration par l'auteur

VI - Conclusions

Ce quatrième chapitre a analysé d'une part les effets de l'introduction d'une infrastructure de Transport Rapide de Masse sur les systèmes d'usage des sols et de transport définissant le couple « transport – usage des sols » et d'autre part leurs conséquences sur les dynamiques de structuration urbaine.

Nous démontrons, au travers d'un exemple concret (le BRT TransMilenio de Bogota), premièrement que l'introduction d'une infrastructure de Transport Rapide de Masse (TRM) a des effets significatifs sur les systèmes de transport et d'usage des sols du fait de l'amélioration de l'accessibilité à la ville qu'elle apporte aux zones desservies. Nous montrons deuxièmement que la traduction de ces effets dans les dynamiques de structuration urbaine dépend de la réaction du couple « transport – usage des sols », c'est-à-dire de la structure urbaine héritée, de la réaction des investisseurs et des promoteurs immobiliers, de l'évolution des choix de localisation des différents groupes socio-économiques et des différentes activités productives, de l'attitude des autres opérateurs de transport – et donc du montage institutionnel mis en place -, et enfin des politiques d'urbanisme mises en place par les autorités en charge de la planification urbaine.

Nous mettons en exergue l'effet positif significatif du BRT sur les valeurs foncières et immobilières des zones desservies. Conformément aux conclusions du chapitre 3, l'évolution des valeurs foncières et immobilières est le reflet et la cause des modifications des dynamiques de structuration de l'espace urbain.

Le TransMilenio engendre une hausse des prix fonciers plus forte et plus précoce dans les zones desservies que celle que connaît en moyenne la ville au début du 21ème siècle mais aussi que celle de l'ensemble des zones en valorisation (affectées et non affectées par le TRM). La réaction des marchés fonciers dans l'aire de chalandise du BRT précède la phase ascendante des prix fonciers sur l'ensemble de la ville. Il est toutefois difficile d'établir si à lui seul le TRM aurait été capable d'inverser localement le cycle global d'évolution des prix. Le TransMilenio semble plus agir comme un catalyseur de la reprise des investissements et de l'activité immobilière vers ses zones d'influence ; et cet effet se manifeste dès l'annonce du projet.

La compétition sur les marchés foncier et immobiliers (locatif, achat-vente de l'ancien et du neuf) entre les différents acteurs urbains pour se localiser dans l'aire de chalandise du BRT et ainsi profiter d'un accès amélioré à l'ensemble de la ville constitue donc un premier effet de l'introduction du TransMilenio. Nous démontrons que cette compétition profite aux fonctions urbaines ayant la meilleure rentabilité de l'usage des sols et donc tirant le meilleur bénéfice de cette amélioration locale de l'accessibilité urbaine.

Nous montrons que cette compétition s'accompagne de phénomènes d'anticipation des effets bénéfiques du TransMilenio. Ces anticipations sont à relier au caractère particulier des biens fonciers et immobiliers : ces biens sont en effet unique du fait de leur localisation et des droits d'usage octroyés sur cette localisation urbaine par les autorités publiques.

Nous montrons d'autre part que la modification de ces droits d'usage sur les sols peut avoir des conséquences aussi importantes que l'introduction d'un TRM sur l'évolution des valeurs foncières.

Nous montrons enfin que les variations dans l'appréciation foncière selon le niveau socio-économique de la population majoritaire d'une zone concordent avec la distribution spatiale de la hausse des valeurs foncières observée dans le chapitre 3 pour la période 1970 – 2000. Par contre, nos analyses des différences de valorisation foncière selon le type d'usage des sols et le degré de consolidation de la zone sur la « période TransMilenio » sont en contradiction avec nos observations effectuées sur le long terme. Nous supposons que cette inversion sur le court terme s'explique par le faible recul temporel de notre analyse des conséquences foncières de cette nouvelle infrastructure de transport : les effets des travaux de construction sont encore dominants alors que l'opération du système montre une influence opposée.

Nous mettons ainsi en exergue une concentration des investissements privés dans l'aire de chalandise de l'infrastructure de transport nouvellement introduite. La consolidation et la densification

le long des corridors BRT constituent donc un second effet de l'introduction du TRM. D'autre part notre analyse conclue à élargissement de l'aire fonctionnelle de Bogota - engendrant un risque d'étalement urbain en tâche d'huile et de conurbation avec les municipalités périphériques – liée au fait que le TransMilenio et son réseau de bus d'alimentation améliore considérablement l'accessibilité des périphéries Nord, Nord-Ouest et Sud où le foncier est peu cher.

Nous démontrons que la réaction des relations fonctionnelles au sein du couple « transport – usage des sols » à la mise en œuvre d'un projet de TRM s'organise selon trois phases :

L'élaboration et le design du projet constituent une première phase marquée par l'incertitude. Cette incertitude porte sur la réalisation du projet, sur le tracé des corridors et sur les conséquences du projet aux niveaux du tissu urbain, de la structure urbaine et des choix de localisation des investissements aussi bien des promoteurs immobiliers que des populations et des activités. Cette phase donne lieu à des stratégies d'anticipation[97].

Les travaux de construction de l'infrastructure de transport constituent la deuxième phase. Cette phase apporte des désagréments, plus forts pour les services et commerces que pour les fonctions résidentielles. L'appréciation des valeurs foncières des usages tertiaires est ainsi ralentie.

Enfin la mise en opération du nouveau système de transport amorce le début de la troisième phase qui se caractérise par une valorisation foncière nettement plus flagrante.

Enfin nous montrons que le TransMilenio a des effets significatifs sur la mobilité. Le BRT s'est rapidement converti en un mode de transport essentiel pour les bogotains ; il représente déjà une part importante dans la répartition modale des déplacements. Si son réseau est étendu et la qualité de son service maintenue, le TransMilenio a le potentiel pour devenir le mode de transport dominant de la capitale colombienne, aussi bien en termes de répartition modale des déplacements que d'effets sur les dynamiques de structuration urbaine.

L'analyse que nous effectuons en confrontant les matrices Origines – Destinations montre une diminution du temps moyen et une augmentation significative de la distance moyenne des déplacements. Ces deux évolutions sont plus importantes dans les périphéries de la ville.

Si le BRT n'a pas modifié radicalement la matrice Origines – Destinations, nous constatons, quatre années après le début des opérations, des tendances à la concentration des Origines et des Destinations des déplacements, et donc des fonctions urbaines, dans la centralité axiale élargie et dans la deuxième couronne, en périphérie de Bogota. Notre étude met donc en exergue une perte d'attractivité de la première couronne autour de la centralité historique élargie.

Ces résultats concordent avec les analyses effectuées sur les réactions des marchés foncier et immobiliers à la mise en place du TransMilenio. L'évolution de la distribution spatiale des ménages et des activités se traduit dans la distribution spatiale et modale des déplacements.

Nous montrons ainsi que les dynamiques urbaines connaissent actuellement une tendance à inverser la structuration urbaine observée dans les années 1980 et 1990 à Bogota. Nous avons en effet démontré dans le chapitre 3 que les dernières décennies du 20ème siècle sont marquées par une phase[98] de consolidation, de densification et de recombinaison interne de la structure urbaine héritée, du fait notamment de la progressive dégradation de la mobilité.

Cette analyse d'une part des effets de l'introduction du TransMilenio sur les systèmes d'usage des sols et de transport définissant le couple « transport – usage des sols » et d'autre part de leurs conséquences sur les dynamiques de structuration urbaine confirme donc une des conclusions du troisième chapitre de cette thèse : un nouvel équilibre semble se mettre en place entre la distribution spatiale des différentes fonctions urbaines, générant une demande d'interaction et donc de mobilité, et le système de transport, caractérisant une offre de mobilité.

[97] Il serait intéressant d'étudier l'évolution de ces stratégies d'anticipation au cours des phases ultérieures de construction des corridors BRT alors que l'incertitude a diminué.

[98] En opposition avec la période 1930 – 1970 d'expansion continue et de polycentralisation.

Nous confirmons ainsi que le fonctionnement du couple « transport – usage des sols » se caractérise par des équilibres successifs entre l'offre et la demande de mobilité. Ces équilibres successifs sont plus ou moins confortables pour les différentes catégories de populations, en fonction d'une part de l'intensité de la compétition pour les localisations urbaines et des inégalités de revenus et d'autre part de leurs accès aux différents modes de transports, notamment aux modes de transport individuels. Ces équilibres se traduisent ainsi premièrement dans la distribution spatiale des prix fonciers et immobiliers et deuxièmement dans la matrice Origines – Destinations et dans la répartition modale des déplacements, et donc dans les consommations énergétiques liées aux transports urbains.

Conclusions de la deuxième partie (Chapitre 3 et 4)

Les deux chapitres de cette deuxième partie avaient pour objectif d'analyser à partir de l'exemple de Bogota et du BRT TransMilenio les relations fonctionnelles entre le système de transport et le système d'usage des sols définissant le couple « transport – usage des sols » et leurs effets sur les dynamiques de structuration urbaine.

Une des conclusions de la première partie était que pour placer les transports urbains des villes du Sud sur des trajectoires soutenables environnementalement, il est nécessaire d'anticiper et d'accompagner les dynamiques de marché qui structurent l'espace urbain et par là déterminent le niveau de consommations énergétiques et émissions de CO_2 liées aux déplacements urbains. Nous mettions alors en avant la pertinence d'une planification urbaine centrée sur le fonctionnement du couple « transport – usage des sols » déterminant la structure urbaine. Nous soutenions la thèse d'une nécessaire « prise en tenaille » des consommations énergétiques des transports urbains par des politiques transports et urbanisme intégrées et complémentaires.

Ces conclusions nous ont donc conduit à nous interroger sur le fonctionnement du couple « transport – usage des sols », sur l'articulation entre ces deux systèmes et les marchés foncier et immobilier et sur la chaîne de causalité selon laquelle l'évolution de ce couple se traduit en termes de structuration urbaine.

Nous avons appuyé cette recherche sur un cas d'étude concret, Bogota (Colombie). Nous avons étudié le fonctionnement du couple « transport – usage des sols » et ses effets sur les dynamiques de structuration urbaine sur le long terme (chapitre 3) et sur le court terme (chapitre 4).

Le troisième chapitre analyse d'une part les liens entre l'évolution du système de transport et celle du système d'usage des sols et d'autre part les processus de structuration urbaine engendrée, depuis la fondation de Bogota en 1538 jusqu'à la fin du 20ème siècle.

Nous démontrons qu'il n'y a pas d'effet structurant prédominant dans le processus de structuration urbaine, ni de la part des infrastructures de transport, ni de la part des politiques publiques. Ce sont bien les relations fonctionnelles au sein du couple « transport – usage des sols » qui sont au cœur des dynamiques de structuration urbaine et donc des consommations énergétiques liées aux déplacements urbains. Des équilibres successifs s'établissent entre la distribution spatiale des résidences et des activités, générant une demande de mobilité, et le système de transport, caractérisant une offre de mobilité. La situation de la mobilité, l'activité de production foncière et immobilière, la planification urbaine et la politique d'investissement dans les infrastructures de transport sont interdépendantes et co-déterminées. Ces équilibres se traduisent alors d'une part dans une matrice Origine-Destination et une répartition modale des déplacements réalisés – et donc dans les consommations énergétiques liées aux transports urbains - et d'autre part dans la distribution spatiale des prix fonciers et immobiliers. Nous montrons également que les décisions de localisation des investissements résidentiels et d'activités et les prix fonciers et immobiliers sont de même interdépendants et co-déterminés. Les dynamiques des marchés foncier et immobiliers sont alors à la fois le reflet et des causes du processus de structuration urbaine. Enfin, nos analyses concluent que les relations fonctionnelles au sein du couple « transport – usage des sols » se construisent dans un cadre défini par la géographie physique du site, les héritages successifs, les politiques menées au niveau national et les caractéristiques culturelles et historiques nationales.

Le quatrième chapitre analyse les perturbations de l'équilibre en place à la fin du 20ème siècle engendrées par l'introduction d'une infrastructure de Transport Rapide de Masse (TRM), le BRT TransMilenio, et leurs conséquences sur les dynamiques de structuration urbaine.

Nous montrons d'une part que le TransMilenio a des effets significatifs sur les systèmes de transport et d'usage des sols du fait de l'amélioration de l'accessibilité à la ville qu'elle apporte aux zones desservies, et d'autre part que la traduction de ces effets dans les dynamiques de structuration urbaine dépend de la structure urbaine héritée, de la réaction des investisseurs privés (promoteurs immobiliers, populations résidentes, fonctions productives, etc.), de l'attitude des autres opérateurs de transports et enfin des politiques d'urbanisme mises en place, c'est-à-dire de la réaction du couple « transport – usage des sols ». Nous démontrons que cette réaction varie au cours des trois phases de la mise en œuvre du projet de TRM : l'élaboration du projet ; les travaux de construction ; l'opération du système.

Le BRT a des effets positifs sur les valeurs foncières et immobilières des zones desservies et cette valorisation est le reflet et la cause des modifications du processus de structuration urbaine. La compétition sur les marchés foncier et immobiliers pour se localiser dans l'aire de chalandise du BRT s'accompagne de phénomènes d'anticipation. Le TransMilenio semble agir comme un catalyseur des investissements et de l'activité immobilière vers ses zones d'influences. Les fonctions urbaines ont tendance à se concentrer dans la centralité axiale historique élargie et dans la deuxième couronne, en périphérie de Bogota. L'attractivité de la première couronne entourant la centralité historique diminue. Nous mettons ainsi en exergue d'une part une consolidation et une densification le long des corridors BRT et d'autre part un élargissement de l'aire fonctionnelle de Bogota. Ce qui révèle dans les dynamiques de structuration urbaine des tendances inverses à celles observées pour les dernières décennies du 20ème siècle.

Les résultats des analyses développées dans les deux premières parties de cette thèse nous conduisent à deux séries d'interrogations :

1) Existe-t-il - et si oui lesquels - des outils qui soient capables d'une part de prendre en compte les relations fonctionnelles au sein du couple « transport – usage des sols » et d'autre part de quantifier sur le long terme les effets sur les consommations énergétiques et émissions de CO_2 liées aux déplacements urbains de combinaisons alternatives de politiques transport et urbanisme ?

Nous avons montré dans les deux premières parties de la thèse que les interactions « transport – usage des sols » sont déterminantes pour la structure urbaine et par là pour le niveau d'énergie consommée dans les déplacements urbains mais aussi qu'elles sont extrêmement complexes. Les paramètres intervenant dans les relations fonctionnelles au sein du couple « transport – usage des sols » sont multiples, interdépendants et co-déterminés. Il est donc indispensable de disposer d'un outil de simulation des dynamiques de structuration urbaine, basé sur une compréhension approfondie des mécanismes de choix de localisations et de transports, pour tester la capacité des politiques présentées dans le chapitre 2 à infléchir significativement les trajectoires de consommations énergétiques liées aux transports urbains.

Cette interrogation fait l'objet du premier chapitre de la troisième partie (chapitre 5 de la thèse).

2) Les politiques de transport et d'urbanisme, mises en œuvre de manière intégrée et complémentaire, permettent-elles effectivement de réduire significativement les consommations énergétiques et émissions de CO_2 liées aux transports urbains ?

Il s'agit de mesurer l'efficacité des différents leviers d'actions - présentés dans le deuxième chapitre de la thèse – à la disposition des autorités urbaines à infléchir les consommations énergétiques dans les transports urbains.

Cette question fait l'objet du deuxième chapitre de la troisième partie (chapitre 6 de la thèse).

Partie 3

Chapitre 5 : Evaluation des outils de simulation des interactions « transport – usage des sols ». Le choix de TRANUS et la construction de TRANUS-SETU.

Chapitre 6 : Application de TRANUS-SETU à Bangalore, Inde.

Introduction de la troisième partie

Les résultats des deux premières parties nous conduisent dans la troisième partie 1) à chercher un outil de simulation des dynamiques de structuration urbaine, capable de modéliser les relations fonctionnelles au sein du couple « transport – usage des sols » dont le rôle clef a été mi en exergue dans le chapitre 1 et la complexité analysée dans la deuxième partie de la thèse, 2) puis à tester, à l'aide de cet outil, la capacité des politiques transport et urbanisme intégrées et complémentaires, la « tenaille » discutée dans le chapitre 2, à infléchir significativement les trajectoires de consommations énergétiques liées aux transports urbains.

Dans le cinquième chapitre de la thèse, nous évaluons les outils de simulation des relations fonctionnelles au sein du couple « transport – usage des sols » existants, nous justifions le choix du modèle TRANUS comme le modèle offrant le meilleur équilibre entre des exigences de pertinence théorique, de cohérence avec notre objet et notre objectif de recherche, de mesurabilité et d'applicabilité, puis nous le complétons par un module de quantification des consommations énergétiques et des émissions de CO_2 liées aux transports urbains des passagers, la Signature Energétique des Transports Urbains (SETU). Ce chapitre s'appuie sur une revue critique de la littérature.

Dans le sixième chapitre de la thèse, nous testons la capacité de la « tenaille de politiques de transport et d'urbanisme intégrées et complémentaires », proposée dans le chapitre 2, à infléchir les trajectoires des consommations énergétiques et émissions de CO_2 liées aux transports urbains. Pour cela, nous appliquons TRANUS-SETU à un cas urbain concret, Bangalore, Inde, et simulons différents scénarios de politiques urbaines.

Chapitre 5 : Evaluation des outils de simulation des interactions « transport – usage des sols ». Le choix de TRANUS et la construction de TRANUS-SETU

La proposition de recherche de notre thèse consiste à examiner si, dans l'hypothèse d'une gouvernance optimale, les technologies existantes et accessibles financièrement aux mégapoles pauvres sont aptes à infléchir significativement les trajectoires de consommations énergétiques et les émissions de CO_2 liées aux transports urbains.

Comme nous l'avons montré dans les chapitres précédents, du fait de la complexité des interactions entre le système d'usage des sols et le système de transport urbain, pour répondre à cette interrogation, il est nécessaire d'utiliser un outil de simulation de l'évolution des structures urbaines sous des scénarios alternatifs de politiques urbaines et un outil d'évaluation de la traduction des ces évolutions en consommations énergétiques et émissions de CO_2 liées aux transports urbains.

Il existe trois méthodes pour prévoir les effets structurants des évolutions du système de transport et du système d'usage des sols. La première consiste à interroger les citadins sur la façon dont ils changeraient leur comportement de localisation résidentielle et de mobilité si certains facteurs tels que les règles d'urbanisme ou le prix du transport étaient modifiés (méthode des préférences déclarées). La deuxième consiste à extrapoler les observations du passé sur l'évolution des comportements provoqués par différentes modifications de ces facteurs (méthode des préférences révélées). La troisième consiste à simuler les comportements à l'aide de modèles mathématiques.

Les trois méthodes ont des avantages et des inconvénients. Les enquêtes peuvent révéler des facteurs subjectifs, pourtant les réponses ne sont que des conjectures incertaines sur la réaction à des situations encore inconnues. Les observations du passé fournissent des résultats solides et détaillés, mais d'une part ils ne sont valides que pour des situations existantes et donc pas pour tester des nouvelles politiques, et d'autre part, il est difficile d'isoler les causes spécifiques responsables de l'évolution observée des comportements. Les modélisations mathématiques des comportements sont aussi basées sur des enquêtes et des observations. La différence réside dans le fait que leurs conclusions sont quantifiées et que les modèles permettent de transférer, avec certaines limites, les comportements dans des situations encore inconnues. Enfin, les modélisations mathématiques sont la seule méthode avec laquelle il est possible d'analyser les effets d'un seul facteur, conservant tous les autres fixes (Wegener, 1994).

La finalité de cette thèse est d'enrichir la réflexion et les débats sur les effets environnementaux à long terme des politiques transport et d'urbanisme. Cette thèse n'est pas tournée vers le développement d'un outil novateur en matière de modélisation des interactions « transport – usage des sols ». Nous cherchons donc un modèle existant et opérationnel, c'est-à-dire dont la validité théorique comme les applications sont reconnues. Dans le chapitre 6, nous appliquons ce modèle, complété pour notre projet par une sortie en consommations d'énergie et émissions de CO_2 liées aux transports urbains, sur Bangalore, Inde.

Ce cinquième chapitre a donc pour objectif de justifier le choix de TRANUS comme le modèle adapté à notre projet de recherche.

Pour cela nous présentons dans la première section les critères de choix de l'outil de simulation. Ces critères sont le résultat des analyses menées dans les deux parties précédentes de la thèse.

Ensuite nous exposons dans la deuxième section les différentes familles de modèles produits par les sciences de la ville. Nous concluons sur l'intérêt des modèles interactifs « transport – usage des sols » pour notre recherche.

Puis nous étudions dans la troisième section les différentes catégories de modèles interactifs pour nous focaliser sur les modèles de prévision quasi-dynamiques parmi lesquels nous choisissons TRANUS comme le modèle correspondant à nos besoins.

Enfin, dans la quatrième section, nous exposons TRANUS en détail et le complétons par la Signature Energétique des Transports Urbains, traduction en terme de consommations d'énergie et d'émission de CO_2 des effets des politiques de transport et d'usage des sols sur la structure urbaine.

I - Les critères de choix de l'outil de simulation

Au fil des chapitres précédents, nous avons mis en exergue un certain nombre de variables dont la prise en compte est essentielle à la prospective des transports urbains. L'intégration de ces variables clefs constitue donc autant de critères requis pour décider de l'outil de simulation pertinent par rapport à nos objet et objectif de recherche. Nous allons les présenter dans cette section.

Pour ce faire, nous nous appuyons sur la typologie des critères d'évaluation d'un modèle quantitatif proposée par Bonnafous (Bonnafous, 1972). Nous les utiliserons tout au long de ce chapitre pour juger de l'opérationnalité des modèles existants et choisir le plus adapté à notre problématique.

Selon la définition de Bonnafous (Bonnafous, 1972), l'opérationnalité d'un modèle est définie par trois conditions nécessaires et suffisantes de cohérence, pertinence et mesurabilité. La cohérence comprend non seulement la cohérence interne du discours logique ou mathématique, mais aussi la cohérence par rapport aux objectifs du modèle. La pertinence signifie la conformité du système formel avec le système réel tel qu'il représente la réalité. La mesurabilité signifie que variables et paramètres doivent pouvoir être estimés à partir d'échantillons statistiques accessibles. Bonnafous montre que ces trois conditions sont contradictoires : l'amélioration de l'une d'elles entre nécessairement en conflit avec les deux autres. C'est donc un équilibre entre ces trois critères opportuns pour notre projet de recherche que nous allons rechercher lors de la présentation des différents modèles existants. TRANUS, comme nous le verrons par la suite, est le modèle qui satisfait au plus près les exigences d'opérationnalité liés à notre problématique.

A - *L'exigence de cohérence*

La cohérence du modèle, c'est à la fois une propriété de cohérence interne et une exigence de cohérence impliquée par l'objectif du modèle.

- **Cohérence interne** : non contradiction dans le formalisme mathématique.
- **Cohérence d'objectif** : parfaite compatibilité entre la structure logico-mathématique du modèle et ses ambitions théoriques.

Nous avons mis en exergue le caractère central du couple « transport – usage des sols » dans les trajectoires de consommations énergétiques et émissions de CO_2 liées aux transports urbains. Du fait de notre objectif de recherche, le critère de cohérence d'objectif se traduit pour notre recherche notamment par l'exigence :

- d'un modèle de prospective afin de produire et comparer les trajectoires de croissance des consommations énergétiques et émissions de CO_2 liées.
- d'un modèle capable de simuler les interactions entre le système de transport et le système d'usage des sols, c'est-à-dire d'endogénéiser la compétition pour la localisation spatiale en fonction de l'accessibilité et les interactions spatiales générant la demande de mobilité.
- d'un modèle capable d'évaluer les effets des politiques alternatives de transport, d'urbanisme et économiques, testées seules ou combinées. TRANUS permet de tester différentes combinaisons des trois principales politiques à la disposition des «aménageurs urbains» : la réglementation sur l'usage des sols urbains et péri-urbains, les investissements dans des infrastructures de transport et les politiques de prix.
- d'un modèle transparent, c'est-à-dire un modèle qui ne soit pas une boîte noire, où l'utilisateur peut suivre la chaîne de causalité conduisant des décisions politiques testées aux consommations

énergétiques et émissions de CO_2 liées. Cela vaut aussi bien pour les nécessités de l'analyse scientifique liées à la thèse elle-même que pour un objectif de travailler avec des outils d'aide à la décision correspondant aux attentes des planificateurs, objectif lié au caractère appliqué de cette thèse. TRANUS est un outil d'aide à la décision pertinent : il permet de discuter les alternatives politiques à partir d'évaluation quantitatives.

Cela nous conduira à privilégier les modèles interactifs « transport –usages des sols » et parmi eux à refuser les modèles d'optimisation.

En accord avec les conclusions des chapitres précédents, l'exigence de cohérence interne se définit par rapport à notre problématique à trois niveaux :

- la cohérence interne dans la simulation du système de transport : Cela nous conduira à préférer l'approche comportementale[99] de la demande de transport afin d'intégrer les caractéristiques techniques –vitesse, coût composite, qualité du service, saturation, etc - des réseaux et leurs évolutions dans la décision du déplacement, de la destination, du mode de transport et du chemin emprunté. De même, nous privilégierons le modèle logit emboîté à échelle[100] pour représenter l'interdépendance des étapes du processus de décision de se déplacer.

- la cohérence interne dans la simulation du système d'usage des sols : il apparaît nécessaire que la représentation des localisations des ménages et des activités passe par la prise en compte des marchés foncier et immobilier. En effet, il est difficile de saisir les aspects clés du processus de développement urbain ou de tester des politiques publiques qui ont un effet sur les prix du foncier sans une modélisation de ces marchés. La représentation et la compréhension de la localisation des ménages sur l'aire d'étude en fonction de leur niveau de revenu nécessitent également la prise en compte de ces marchés. Cela nous conduira à préférer les modèles intégrant les résultats de la micro-économie urbaine : simulation de la compétition pour la localisation urbaine intégrant l'accessibilité des terrains, les fonctions d'enchères des consommateurs de sols, et modélisant la formation des prix fonciers et l'évolution des usages des sols.

- la cohérence interne dans la modélisation de l'interface entre les deux systèmes, transport et usages des sols : cela nous conduira à éliminer d'une part les modèles « connectés » au profit des modèles « pleinement intégrés »[101] et d'autre part les modèles basés sur la maximisation de l'entropie.

En plus de ces trois niveaux, l'exigence de cohérence interne s'applique au modèle dans sa globalité. Cette exigence de cohérence au niveau global nous conduira à préférer les modèles adoptant des interfaces « matrices vers matrices » plutôt que des interfaces « vecteurs vers matrices vers vecteurs »[102].

B - *L'exigence de pertinence*

La pertinence du modèle, c'est **la conformité de structure logico-mathématique avec les réalités de l'objet**, telles qu'on peut les appréhender. Elle concerne la compatibilité entre le formalisme déterminé par la cohérence du modèle et l'objet de ce modèle.

Par structure mathématique du modèle, nous entendons l'ensemble des équations et, le cas échéant, des distributions probabilistes qu'il comporte. Par structure logique du modèle, nous entendons la distribution des rôles respectifs (d'effets ou de causes) des variables, ainsi que l'ensemble des relations de causalité.

---

[99] Nous présentons l'approche comportementale de la demande de transport dans la sous-section II.C.2.

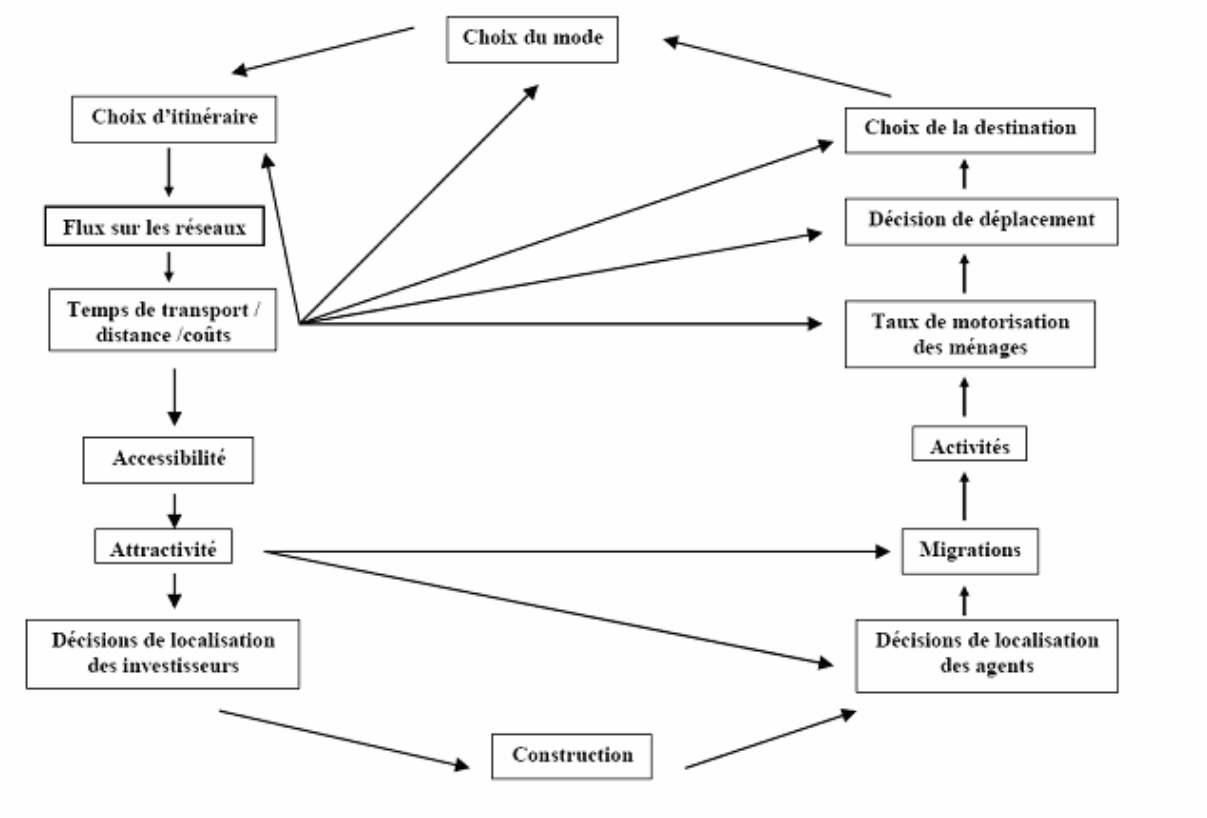
[100] Nous discutons la modélisation de l'interdépendance des étapes du processus de décision de se déplacer dans la sous-section III.B.2.b.

[101] Nous présentons ces spécificités de structure des modèles dans la sous-section III.A.4.

[102] Nous discutons la cohérence des interfaces « matrices vers matrices » par rapport à celle des interfaces « vecteurs vers matrices vers vecteurs » dans la sous-section III.E.2.b

Cela signifie que nous privilégions les modèles prenant en considération les différents sous-systèmes urbains intervenant dans la co-évolution structurante du couple « transport – usage des sols ». Wegener (1994) distingue huit types de sous-systèmes urbains : les réseaux, le mode d'occupation des sols, les lieux d'emploi, les lieux de résidence, l'emploi, la population, le transport de marchandises et les déplacements de personnes.

Graphe 42 : Boucle de rétroaction Transport – Usage des Sols.



Source : Wegener, 1994 cité dans Deymier, Nicolas, 2005.

En accord avec les conclusions des deux premières parties de cette thèse, la pertinence de la représentation des dimensions spatiale et temporelle du système urbain nous paraît cruciale.

Nous privilégions ainsi les modèles nous permettant d'intégrer le regard macro-géographique sur les spécificités et les forces d'attraction, de diffusion et de répulsion entre les différentes zones du territoire urbain. Comme nous l'avons vu dans le chapitre 4, les effets d'une infrastructure ne sont pas homogènes sur l'ensemble des zones urbaines. Cela nous conduira notamment à rejeter les modèles à espace continu.

De même nous privilégions les modèles (quasi)-dynamiques permettant de prendre en compte les temporalités d'évolution différentes des sous-systèmes urbains à considérer. En effet, comme nous l'avons mis en exergue dans la partie 2 de cette thèse, et comme le souligne Wegener et Fürst (Wegener, Fürst, 1999) les différents sous-systèmes urbains en interaction se transforment selon des vitesses différentes :

- Evolution très lente : réseaux, occupation des sols.
- Evolution lente : lieux d'emplois, logements.
- Evolution rapide : emploi, population.
- Evolution immédiate : le transport des biens, les déplacements des personnes.

Cela nous conduira à éliminer les modèles statiques et les modèles d'optimisation.

Enfin nous privilégions les modèles ayant apporté au cours de leurs différentes applications certaines preuves de validité et fiabilité.

Ainsi, pour Masson (Masson, 1998), l'ultime test de validation consiste en l'application du modèle de façon rétrospective afin de reproduire l'évolution du système urbain sur une longue période. Cette solution se heurte à la disponibilité des données nécessaires. Masson (Masson, 1998) poursuit en proposant de tester un programme d'investissement majeur en transport et d'effectuer une comparaison entre les résultats simulés et les effets effectivement observés. Aujourd'hui, à notre connaissance, TRANUS est le seul modèle urbain à avoir passé avec succès ces deux tests de validation, sur le long terme et le court terme :

- Avant de lui confier l'élaboration de son plan d'urbanisme 2000-2020, la municipalité de Baltimore (USA) a demandé à l'équipe Modelistica ayant développé TRANUS de reproduire la structure urbaine de Baltimore en 2000 à partir des données de 1990 (et bien sûr sans celles de 2000). Amplement satisfaite des projections faites sur 10 ans par TRANUS, la municipalité a remis les données de 2000 à Modelistica.

- En 2003 travaillant à partir de données de 1999 à hiérarchiser le programme d'investissement dans le réseau routier de Bogota (Colombie), TRANUS a dû reproduire l'évolution urbaine entre 1999 et 2003, et notamment les conséquences de l'introduction du B.R.T. TransMilenio (2001). Les résultats fournis par TRANUS ont été ensuite validés par une collecte des données réalisée ultérieurement (pour un autre projet).

D'autre part, cette exigence de fiabilité et de validité nous conduira à préférer des modèles ayant été largement appliqués, si possible dans des contextes urbains différents, voire sur des villes pauvres où la qualité et la quantité des données ne sont pas parfaites.

C - *L'exigence de mesurabilité*

La mesurabilité correspond à la possibilité de proposer une estimation pour toutes les grandeurs intervenant dans le modèle. Elle dépend donc de deux facteurs : la gourmandise du modèle en qualité et quantité de données, et l'accessibilité des données sur la ville étudiée. Notre projet étant de travailler sur Bangalore, et même si nous avons profité sur place du soutien du bureau d'étude SCE-CREOCEAN en charge de l'élaboration du plan d'urbanisme de la ville, ce critère est essentiel pour notre recherche.

Nous ajoutons dans ce critère de mesurabilité des exigences propres au caractère doctoral de cette recherche et à l'ignorance totale de ces modèles en début de thèse qui ont obligé l'auteur à tenir compte des paramètres de prise en main des modèles dans le choix de TRANUS : le coût du logiciel (gratuit), la possibilité de le modifier (code source en accès libre), le niveau de puissance nécessaire de l'ordinateur (sur un ordinateur portable), sa convivialité (interface utilisateur Windows), le temps de calibration (raisonnable) et de simulation (court).

Depuis Janvier 2005, Modelistica a supprimé complètement la licence de TRANUS. Il est donc aujourd'hui possible de télécharger le logiciel, les manuels et exemples d'application depuis la page web de l'entreprise. Les matériaux sont développés en espagnol et en anglais. Cela veut dire que les usagers peuvent utiliser le logiciel de manière complètement gratuite et pour les objectifs qui les intéressent. Modelistica s'engage à actualiser les versions de TRANUS disponibles sur son site.

Les modèles intégrés «transport – usages des sols» sont des modèles complexes, difficiles à prendre en main. Ces outils ne seront jamais des « logiciels presse boutons ». Un système ville est complexe, sa durabilité d'autant plus ; les outils de suivi-évaluation le resteront. Parmi ces modèles, TRANUS est le modèle intégré le plus convivial, notamment grâce à ses interfaces Windows et graphique.

Enfin, à l'instar du choix de TRANUS effectué en 1994 par le CERTU pour travailler sur la ville de Lyon (Clément, 1996), et de la plupart des expériences d'utilisation de modèles urbains, il apparaît que la disponibilité d'une aide soit un critère de choix pertinent. Le concepteur de TRANUS, de la Barra, accompagne la mise à disposition gratuite de TRANUS d'exemples d'applications didactiques et d'un ensemble de documents présentant les opérations de modèle et la base mathématique sous-jacentes aux modèles. D'autre part, comme le souligne l'EPA dans son rapport comparant les modèles urbains opérationnels (EPA, 2000), de la Barra est personnellement très disponible pour accompagner les utilisateurs de TRANUS (par courriel et personnellement).

II - Les théories et méthodes développées pour représenter les interactions « transport – usage des sols »

Wegener et Fürst (Wegener, Fürst, 1999) distingue trois traditions théoriques majeures cherchant à expliciter puis modéliser les interactions entre les usages des sols et les transports dans les aires urbaines.

Les modèles produits par la géographie et la sociologie, notamment à partir des travaux de l'école de la sociologie urbaine de Chicago à partir de l'entre-deux-guerres, constituent la première tradition. Ces modèles sont riches d'enseignement mais d'une part leurs conclusions pour l'analyse des processus de structuration de l'espace urbain sont essentiellement qualitatives, d'autre part, ils n'éclairent pas explicitement notre problématique, à savoir la complexité des interactions « Transport – Urbanisme ».

Les modèles de la micro-économie constituent la deuxième tradition. Ils sont basés pour l'essentiel sur les travaux de Von Thünen adaptés à la ville par Alonso en 1964 et complétés depuis, notamment pas Fujita en 1989. Ces modèles permettent de tirer certaines conclusions essentielles sur les mécanismes d'interaction entre transport et urbanisation. Cependant, du fait de leurs hypothèses trop restrictives, ces modélisations n'offrent pas une description de la ville suffisamment conforme à la réalité pour être opérationnelles. La conception d'un espace monocentrique et isotrope ne permet de considérer ni la complexité des localisations définies par rapport à plusieurs points, ni l'existence de caractéristiques propres à chaque lieu.

Enfin vient la troisième tradition : les modèles que nous nommons « des ingénieurs et planificateurs » parce qu'ils sont nés après-guerre, avec l'explosion de la mobilité, et relèvent d'une volonté de planifier le développement de la mobilité. Ils ont clairement des visées opérationnelles dès l'origine. Un trait marquant de cette tradition est la volonté pragmatique de ne pas s'inscrire dans une théorie monolithique et solide mais plutôt de mobiliser différentes techniques, provenant de différentes approches voire différentes sciences, au risque parfois d'une certaine acrobatie théorique. Cette tradition modélisatrice a donné lieu à différentes familles de modèles, dont les modèles interactifs « transport – usage des sols » auxquels nous nous intéressons plus particulièrement dans la suite de ce chapitre.

A - *Les théories sociales (géographie et sociologie)*

1) Le développement urbain, résultat de l'appropriation individuelle et collective de l'espace

Depuis Durkheim et Simmel, la ville est considérée comme une dimension fondamentale de l'existence humaine (Wegener, Fürst, 1999). Certains auteurs ont défini la ville comme l'interface entre le public et le privé (Bahrdt, 1969), la scène des relations sociales et de l'expression du soi (Goffman, 1959), le medium entre le monde et la vie quotidienne (Lefebvre, 1968) ou le champ d'action des mouvements sociaux (Harvey, 1973 ; Castells, 1977). Mais ces approches ne se sont pas intéressées aux dimensions spatiale et temporelle du développement urbain.

L'étude du passé urbain est restée du domaine des historiens comme Mumford (Mumford, 1938 ; 1961) ou Gutkind (Gutkind, 1964 ; 1972). Leur méthode était essentiellement herméneutique, c'est-à-dire visant à comprendre les processus individuels comme une constellation de causes et d'effets (Wegener, Fürst, 1999). Au-delà des similarités observées dans différentes villes à différentes époques, aucune régularité ou loi de co-variation entre des variables n'a été trouvée.

L'apport déterminant pour l'analyse des dimensions spatiale et temporelle du développement urbain en sociologie date de l'entre-deux-guerres lorsque l'école de la sociologie urbaine de Chicago s'intéresse aux processus d'évolution sociaux des quartiers et des différentes échelles de la ville. A partir d'une adaptation de la pensée évolutionniste venant de la philosophie (Spencer) et de la biologie (Darwin), les sociologues de Chicago interprètent la ville comme un écosystème multi-espèce, au sein duquel les groupes sociaux et économiques luttent pour des « positions écologiques » (Park et al.,

1925 ; 1936). En termes spatiaux, la position écologique est un territoire au même titre qu'un quartier ou une région. L'appropriation d'un espace prend la forme d'une invasion par un groupe ethnique, un groupe social ou des activités tertiaires dans un quartier résidentiel. L'école de Chicago utilise ainsi des concepts empruntés à l'écologie animale et végétale, comme « invasion », « succession » ou « dominance », pour décrire les phases de tels déplacements.

2) Les modèles produits

Ces concepts pouvaient être testés empiriquement et ainsi généralisés et théorisés. En conséquence, différentes théories qualitatives du développement urbain émergèrent pour expliquer l'expansion spatiale des villes états-uniennes. Les trois principales théories sont : la théorie des cercles concentriques formulée par Burgess (Burgess, 1925) à partir de ces travaux sur la ville de Chicago ; la théorie des secteurs de Hoyt (Hoyt, 1939) fondée sur l'étude empirique de nombreuses villes américaines ; et la théorie des noyaux multiples formulée par Harris et Ullman (Harris, Ullman, 1945), qui propose une représentation multicentrique de la ville.

Graphe 43 : Représentations des trois principaux modèles de la géographie urbaine

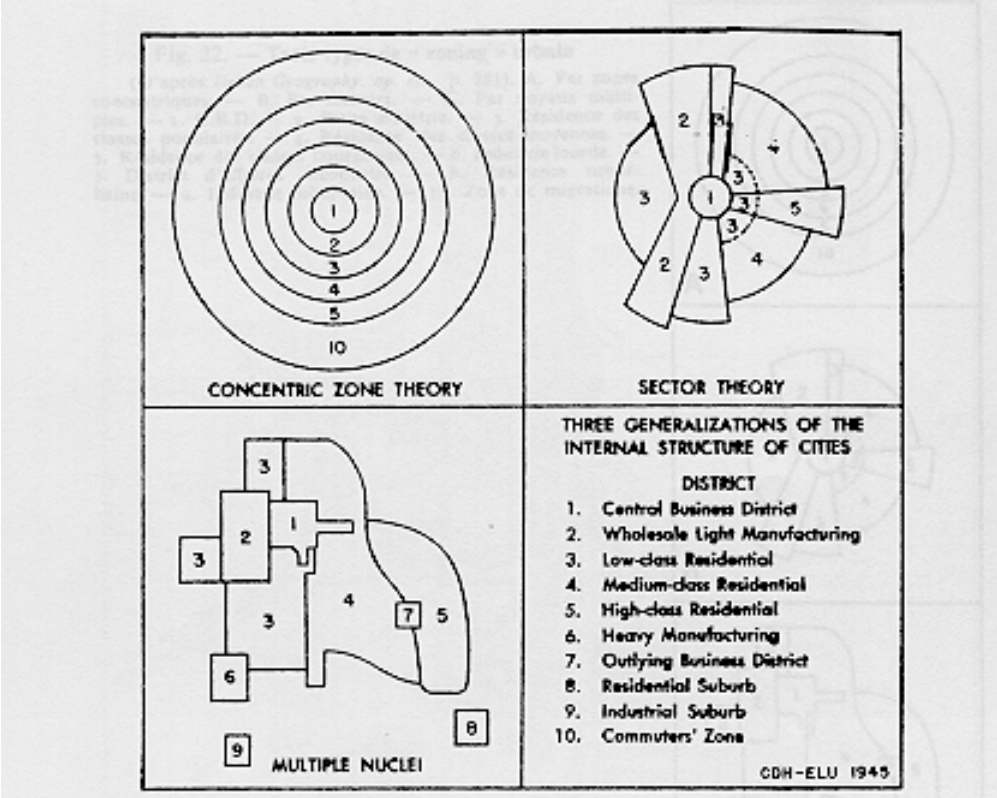


FIG. 5.—Generalizations of internal structure of cities. The concentric-zone theory is a generalization for all cities. The arrangement of the sectors in the sector theory varies from city to city. The diagram for multiple nuclei represents one possible pattern among innumerable variations.

La géographie sociale s'appuie sur ces concepts et explore les comportements spatio-temporels des groupes spécifiques en fonction de leur genre, âge, revenu, etc. Ces travaux se traduisent en terme d' « espace d'action[103] » (Chapin, 1965 ; Chapin, Weiss, 1968 ; Hägerstrand, 1970) et aboutissent aux observations de Zahavi (Zahavi, 1980) sur la double constante temps et budget consacré aux transports urbains.

[103] L'« espace d'action » est caractérisé par une superficie et un temps dans lesquels chaque individu, selon ses caractéristiques propres et celles du réseau technique, peut agir.

3) Les limites

Même si leurs enseignements sur le regard macro-géographique sont pertinents, ces méthodes d'analyse sociale ne peuvent pas être utilisées directement dans notre recherche. Ces théories sont essentiellement des théories sociologiques : le temps et l'espace ne sont pris en compte qu'en tant que catégories d'analyse ; les intervalles de temps et d'espace ne sont représentés que de manière rudimentaire (Wegener, Fürst, 1999). Les conclusions pour l'analyse des processus de structuration de l'espace urbain sont essentiellement qualitatives. La quantification des consommations énergétiques est impossible. De plus, ces approches n'envisagent pas explicitement les interactions du couple « transport – usage des sols ».

Malgré ces limites, les concepts et analyses construits par les théories sociales restent utiles à la compréhension du développement urbain. Elles enrichissement opportunément les analyses économiques que nous présentons par la suite. Par exemple, ces théories ont permis l'analyse de la « gentrification », l'invasion par la classe moyenne des centres villes et quartiers populaires (Smith, Williams, 1986). La double constante temps et budget proposée par Zahavi explique que les gains de vitesse ne sont pas traduit en une économie de temps de transport mais en une augmentation des distances parcourues, pour augmenter d'autant les opportunités atteintes. De même, la loi de Zahavi nous permet de comprendre pourquoi la diminution du prix réel du pétrole dans les pays européens durant les quarante dernières années ne s'est pas traduite par des économies dans le budget des ménages, mais par une expansion des trajets en voitures.

B - *Les théories micro économiques*

La deuxième tradition théorique tendant à expliciter et modéliser les interactions « transport – usage des sols » en ville s'appuie sur les travaux de Von Thünen (Von Thünen, 1826) qui ont été adaptés au contexte urbain par Alonso (Alonso, 1964) et plus récemment complétés par Fujita (Fujita, 1989).

Du fait de ses hypothèses trop restrictives et compte tenu des critères exposés en première section, l'approche classique de la micro-économie urbaine ne peut être retenue pour notre projet de recherche. Les modélisations issues des théories micro-économiques permettent cependant une première approche féconde du développement urbain, puisqu'on peut en dériver un certain nombre de résultats en accord avec les observations empiriques les plus marquantes. De plus, les modèles interactifs, et tout particulièrement TRANUS, mobilisent différentes techniques de modélisations issues de la micro-économie.

Ainsi, nous présentons ici les modèles de la micro-économie urbaine, non pour en faire une présentation exhaustive mais dans l'objectif d'en étudier les techniques et d'analyser les grands enseignements de la tradition de micro-économie urbaine issue des travaux d'Alonso.

1) Les hypothèses du modèle de base de la localisation résidentielle (Alonso 1964)

La micro-économie urbaine plonge ses racines dans la théorie de la localisation agricole de Von Thünen (Von Thünen, 1826). Afin d'analyser les mécanismes d'affectation du sol en milieu urbain, Alonso (Alonso, 1964) transpose l'analyse de Von Thünen à la localisation des résidences et des activités urbaines. Les objectifs d'Alonso sont d'expliquer la structure interne des villes et de comprendre où et pourquoi se localisent les différents agents urbains. Alonso développe alors une théorie économique reliant la rente foncière aux utilisations du sol, dans la lignée des travaux de Von Thünen. Nous centrons la présentation de son modèle sur l'analyse de la localisation résidentielle.

Alonso définit des hypothèses qu'il est indispensable de connaître pour comprendre les résultats pouvant être dérivés de ce modèle ainsi que leur portée. Les hypothèses principales portent sur la représentation de l'espace urbain, et les caractéristiques des activités et des agents économiques, des déplacements et du marché foncier.

a) La représentation de l’espace urbain

La ville est circulaire et monocentrique. Elle est composée d'un disque central, le CBD (Central Business District) rassemblant l'ensemble des entreprises de la ville et d'un anneau périphérique, la zone résidentielle, qui s'étend tout autour.

La ville est située dans une plaine homogène ; les sols urbains sont supposés sans contraintes d'utilisation, de qualité uniforme, d'égales aménités. Ils fournissent les mêmes quantités de services quelle que soit leur localisation relativement au CBD. Il n'y a pas de coûts associés à la modification de la localisation résidentielle. Le choix de localisation des agents et des activités se réduit au paramètre de décision de la distance à vol d'oiseau au CBD.

b) Les caractéristiques des activités et des agents économiques

Les activités urbaines se répartissent entre les entreprises productrices de biens, concentrées dans le CBD, et celles du secteur de construction de voirie qui constitue la seule activité industrielle prenant place dans la zone résidentielle. Pour Alonso, la production des logements n'existe pas en tant qu’activité économique. Les ménages auto-produisent leurs résidences. Cette hypothèse très réductrice fut plus tard abandonnée par Mills (Mills, 1967) puis Muth (Muth, 1969). Les agents économiques sont les ménages. Alonso suppose qu'ils ont les mêmes revenus et préférences.

c) Les caractéristiques des déplacements

Les déplacements sont effectués par le salarié de chaque ménage. Leurs trajets aller et retour sont quotidiens et de coût unitaire constant. Le sens des déplacements est le même pour tous les salariés, puisqu'ils sont tous employés au CBD. Alonso considère un seul mode de transport, l'automobile. La configuration du réseau viaire est alors radio-concentrique : les routes convergent vers le CBD. Alonso évacue ainsi les problèmes liés aux difficultés de transport, qui sont pourtant une caractéristique importante des mégapoles.

d) Les enchères sur le marché foncier

Le marché foncier alloue les sols disponibles à chaque usage puis à chaque ménage par un mécanisme d'enchères au plus offrant. Les agents qui participent aux enchères foncières de la zone résidentielle sont les ménages et les producteurs de services de voirie.

Le marché foncier se caractérise par :

- Une concurrence pure et parfaite ;
- Une production permanente d’enchère,
- le fait que chaque acteur est capable de classer les zones urbaines concentriques dans un ordre correspondant à ses revenus et préférences (pour les ménages) ou à son profit net (pour les entreprises).

Une conséquence essentielle de ces hypothèses sur le processus de structuration urbaine est que les différentes localisations ne se distinguent entre elles que par leur distance au centre. La ville modélisée par Alonso est ainsi unidimensionnelle. L’espace urbain est monocentrique et isotrope, ce qui ne permet de prendre en compte ni la complexité des localisations définies par rapport à plusieurs points, ni l'existence de caractéristiques propres à chaque lieu.

Nous allons présenter la formalisation mathématique du modèle d'Alonso et ses résultats. Nous discuterons ensuite comment certaines hypothèses restrictives ont progressivement été levées sans remettre en cause le principal résultat du modèle d’Alonso : l’arbitrage entre coût du logement et coût des déplacements domicile-travail comme déterminant des localisations résidentielles.

2) Formalisation mathématique du modèle d'Alonso

a) Les conditions de l'équilibre spatial des ménages

Conformément à la théorie néoclassique du consommateur, le ménage cherche dans son choix de localisation à maximiser son niveau d'utilité sous contrainte de son revenu et de prix. Alonso considère que chaque ménage consomme un logement, défini comme une surface de sol, le transport vers son lieu d'emploi au CBD et un bien composite incluant tous les biens autres que le logement et le transport, c'est-à-dire les biens non spatialisés. Le ménage est considéré comme le producteur de son logement, et sa consommation de sol conditionne donc directement son niveau d'utilité. Les coûts de construction ne sont pas envisagés.

Le comportement du consommateur se formalise donc de la façon suivante[104] :
Max U = U (X, S, D)
sous la contrainte

$$Y \geq p_x X + p(D)S + C(D)$$

où
X représente le bien composite, de prix unitaire p_x . $U'_X>0$, il s'agit d'un bien normal.
S est la quantité de sol de prix unitaire *p* variable en fonction de la distance au centre *D*, $U'_S>0$, utilité marginale positive.
C(D) le coût de transport entre domicile et lieu de travail, fonction de la distance au centre *D*, $U'_D<0$, toutes choses égales d'ailleurs, son éloignement au CBD se traduit par une désutilité.
Y est le revenu du ménage.

Alonso fait l'hypothèse d'une préférence des ménages pour la centralité (la dérivée de *U* par rapport à *D* est négative : $U'_D<0$ alors que *X* et *S* étant des biens normaux, $U'_X>0$ et $U'_S>0$). Alonso explicite peu le contenu de cette hypothèse[105]. La préférence pour la centralité n'a pas lieu d'être dans le cadre d'un espace isotrope. Elle peut toutefois être comprise comme un moyen de prendre en compte les désagréments des migrations alternantes et les déplacements autres que ceux ayant pour destination le travail (Masson, 2000). Goffette-Nagot (Goffette-Nagot, 1994) montre que lever cette hypothèse n'a pas d'influence sur les résultats.

Alonso dérive les conditions d'équilibre du consommateur en annulant les dérivées partielles premières de la fonction de Lagrange associée à ce problème.

$$L = U(X, S, D) - \lambda[Y - (p_X X + p(D)S + C(D))]$$

Où λ est un multiplicateur de Lagrange.

Alonso obtient alors le système suivant :
Equation (1)

$$\frac{U'_S}{U'_X} = \frac{p(D)}{p_X}$$

[104] Cette présentation est reprise de Goffette-Nagot (Goffette-Nagot, 1994) citée par Masson (Masson, 2000).

[105] L'absence de préférence pour la centralité sera l'hypothèse généralement retenue dans les modèles de la Nouvelle Economie Urbaine développée par Fujita.

Equation (2)

$$\frac{U'_D}{U'_X} = \frac{p_D S + C_D}{p_X}$$

Equation (3)

$$Y = p_X X + p(D)S + C(D)$$

L'équation (1) signifie que le rapport des utilités marginales de consommation de sol et du bien composite, c'est-à-dire le taux marginal de substitution du sol au bien composite est égal, à l'équilibre, au rapport de leur prix. Ce taux marginal de substitution entre sol et bien composite décroît avec la distance. Cela indique que la consommation de sol s'accroît avec l'éloignement du CBD.

L'équation (2) définit la condition d'équilibre spatial. Ainsi à l'équilibre, le taux marginal de substitution entre la distance et le bien composite est égal au rapport entre une quantité $p_D S+C_D$ et le prix du bien composite p_X. Ce rapport peut être interprété comme un rapport de prix (Masson, 2000). La quantité $p_D S+C_D$ désigne le prix d'un déplacement marginal de la localisation du ménage : le premier terme de cette expression est le produit de la dérivée de la fonction du prix du sol et de la quantité de logement consommée par le ménage à l'équilibre, il représente le gain sur la dépense en logement procuré par un éloignement marginal du centre ; le second terme désigne la dépense supplémentaire de transport supportée par le ménage pour un éloignement marginal. Alonso nomme la quantité $p_D S+C_D$: « coût marginal d'un mouvement spatial » (cité dans Masson, 2000). Coût de transport et frais de « localisation » varient en sens inverse : un rapprochement unitaire du centre se traduit par un accroissement de ces frais et une diminution de ces coûts de transport. La fonction d'utilité étant décroissante en fonction de la distance ($U'_D<0$), l'utilité marginale et le prix du bien composite étant positifs ($U'_X>0$, $p_X>0$), le coût marginal d'un éloignement du centre du lieu de résidence du ménage doit être négatif ($p_D S+C_D<0$). En outre, comme la quantité de logement consommée *S* est positive, de même que le coût marginal du transport C_D, la dérivée de la fonction de prix du sol par rapport à la distance P_D doit elle aussi être négative. Cela signifie que le ménage, pour atteindre l'équilibre, se localise en un lieu où, d'une part, la fonction de prix du sol est décroissante et où, d'autre part, le gain sur la dépense en logement procuré par un déplacement marginal de localisation excédera la dépense en transport supplémentaire. Alonso obtient ainsi les conditions de l'équilibre spatial des ménages.

L'équation (3) signifie que la contrainte de budget est saturée à l'optimum.

Goffette-Nagot (Goffette-Nagot, 1994) montre que les hypothèses d'existence des coûts de transport et celle de la préférence pour la centralité ne se situent pas au même plan : la première est essentielle au modèle, alors que la deuxième n'est que contingente. En effet, Muth (Muth, 1969) démontre que l'absence de préférence pour la centralité ($U'_D=0$) ne remet pas en cause les résultats précédents. Les autres hypothèses restant inchangées, l'équation (2) est remplacée par $-p_D S=C_D$, dite condition de Muth. Cette nouvelle équation signifie cette fois que le gain marginal sur la dépense de logement est exactement compensé par la dépense marginale en transport.

b) Le mécanisme d'enchère foncière

Ainsi, dans les modèles de la micro-économie urbaine développés dans la suite des travaux d'Alonso, la localisation intra-urbaine des ménages résulte d'un arbitrage entre accessibilité au CBD, où sont concentrés tous les emplois, et consommation de logement dont le prix diminue avec la distance au centre (Fujita, 1989). Cet arbitrage s'exprime à travers un mécanisme d'enchère foncière. Chaque localisation étant attribuée au plus offrant, ce mécanisme des enchères aboutit, dans un espace homogène, à la formation de courbes de rente foncière décroissantes avec la distance au CBD. Alonso utilise le concept de courbes de rente offerte (ou courbe d'enchère). Il désigne ainsi le prix du sol *r(D)* que les ménages sont prêts à payer, en fonction de la distance au CBD, de façon à conserver un niveau d'utilité constant et optimal. Chaque ménage va donc considérer la rente de marché comme un paramètre. Gannon (Gannon, 1992) qualifie ces enchères « d'enchères de localisation », dans la

mesure où ce qui est convoité n'est pas le sol lui-même mais sa distance au CBD. Masson (Masson, 2000) les qualifie d'enchères d'accessibilité au CBD.

3) Les principaux enseignements du modèle d'Alonso

A partir de ce modèle de base, Alonso tire des résultats utiles pour la compréhension de certains aspects du développement urbain, et notamment des relations fonctionnelles entre le système de transport et le système d'usage des sols[106].

a) Effet d'une variation des coûts de transport

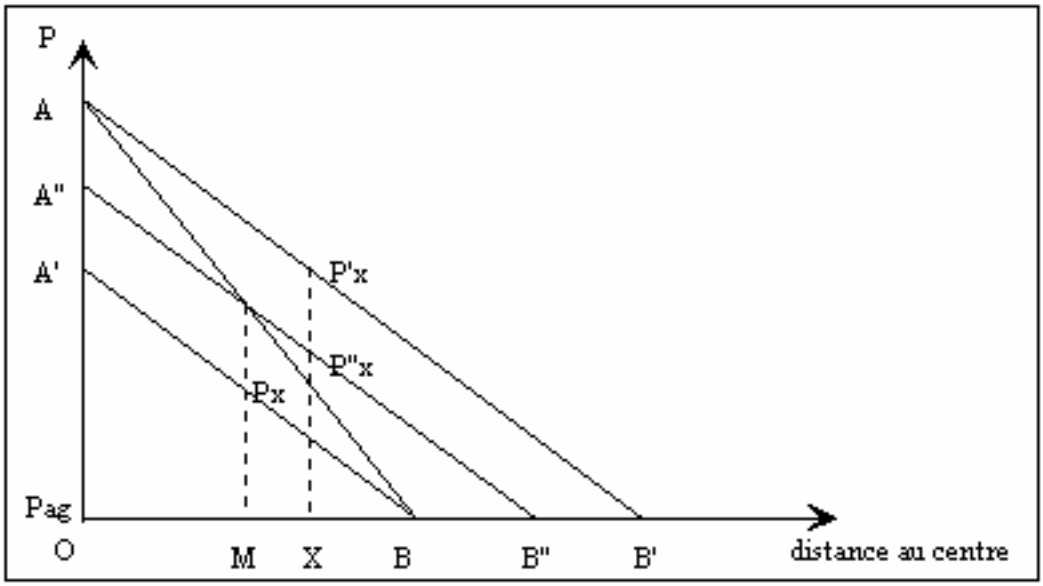
Les coûts de transport sont pour le salarié le critère central de son arbitrage entre sa position dans l'espace et la valeur du sol qu'il est prêt à payer. Ces coûts sont linéaires, ce qui permet à Alonso de déduire un profil d'offre de rente linéaire décroissant.

Une amélioration des moyens de transport peut avoir deux effets (Goffette-Nagot, 1994) : soit elle diminue la pénibilité des déplacements (et donc la désutilité de la distance), soit elle diminue les coûts de transport. Dans les deux cas, que l'effet de l'amélioration des moyens de transport s'exerce sur la fonction d'utilité des ménages ou sur la contrainte budgétaire, la pente des courbes de rente offerte diminue. La conséquence est alors une diminution de la pente de la fonction de prix du sol qui combine deux effets (Masson, 2000). Le graphe 44 schématise ces deux effets.

Dans un premier temps, cette diminution de la pente de la fonction de prix du sol produit une diminution du prix du sol en tout point (effet prix), y compris au centre : la fonction du prix du sol, initialement en AB devient A'B, le niveau de rente foncière atteint en B étant égal à la rente agricole.

Cependant, du fait de cette diminution du prix du sol, il se produit dans un second temps un accroissement de la demande de sol (effet revenu), qui provoque une translation de la courbe de prix du sol en A"B". Nous constatons alors que les prix diminuent à l'intérieur d'un cercle de diamètre OM, alors qu'ils augmentent au-delà. Ainsi l'amélioration du transport provoque une diminution des pentes des courbes de rente offerte par les ménages, qui sont alors amenés à se localiser plus loin que précédemment, ce qui permet aux ménages situés à proximité immédiate du centre de voir diminuer le prix du sol et donc de profiter aussi des effets de l'amélioration du transport.

Graphe 44 : Effets d'une amélioration des moyens de transport sur la fonction de prix du sol
Source : Masson, 2000



[106] Comme pour l'étude de la formalisation mathématique, la présentation des résultats du modèle d'Alonso est reprise de Goffette-Nagot (Goffette-Nagot, 1994) citée par Masson (Masson, 2000).

b) Effet d'une augmentation générale des revenus et d'une différenciation des revenus au sein d'une population

Goffette-Nagot (Goffette-Nagot, 1994) démontre qu'il faut distinguer dans les effets de revenu, les effets d'une augmentation générale des revenus et les effets d'une différenciation des revenus au sein de la population de la ville.

L'augmentation générale des revenus engendre des effets similaires à ceux provoqués par une diminution des coûts de transport. Si, comme dans le cas des villes américaines, la préférence pour la consommation de sol est forte relativement à la préférence pour l'accessibilité, cela aboutira à une diminution de la pente des courbes de rente offerte. Cependant, si dans le cas d'une diminution des coûts de transport, on sait que le prix au centre doit diminuer, la conséquence d'une augmentation générale des revenus sur le prix au centre est quant à elle incertaine.

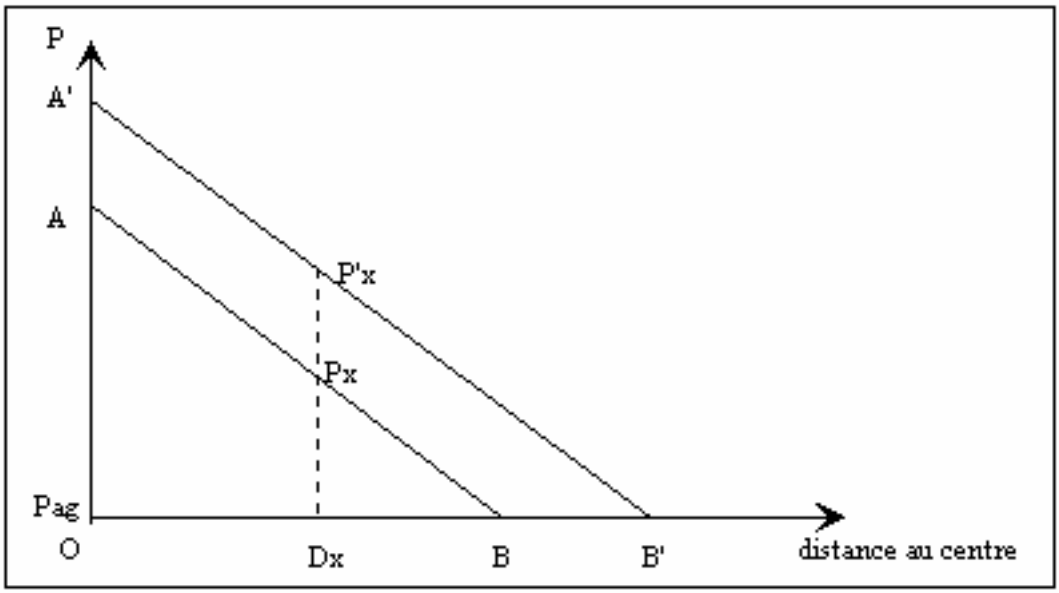
Fujita (Fujita, 1989) démontre, sous hypothèse d'une absence de préférence pour la centralité, la différence entre ces deux options. Dans le cas d'une augmentation générale des revenus, la variation du prix au centre dépend de la fonction de coût de transport et de la disponibilité au sol en fonction de la distance. Ainsi, pour un coût marginal de transport indépendant de la distance, si la disponibilité en sol augmente avec la distance (c'est le cas des villes circulaires), le prix au centre diminue alors que le prix en périphérie s'accroît ; si au contraire la disponibilité en sol est indépendante de la distance (cas des villes linéaires), le prix est constant au centre et s'accroît partout ailleurs ; enfin, si la disponibilité en sol se réduit quand on s'éloigne du centre (il peut exister des contraintes de zonage), le prix du sol augmente partout.

Alonso analyse aussi les effets d'une différenciation des revenus au sein de la population. Alonso explique ainsi la suburbanisation des villes américaines où les ménages les plus aisés se localisent dans des banlieues résidentielles lointaines, délaissant les centres-villes dont les logements se dégradent. Sachant que ce sont les ménages qui ont les courbes d'enchères les plus pentues qui se localisent près du centre, la répartition des ménages en fonction de leur revenu observée dans les villes américaines pourrait être expliquée par le modèle si les courbes de rente offerte étaient d'autant plus pentues que le revenu est faible. Cependant, l'examen de la dérivée de la courbe d'enchères à l'équilibre montre qu'il est impossible de conclure sur l'effet du revenu sur la pente de la courbe de rente offerte sans recourir à des hypothèses supplémentaires sur les préférences des ménages selon leur revenu. Alonso suppose alors que la pente des courbes de rente offerte est moins forte pour les ménages à haut revenu parce que l'effet de l'accroissement de l'utilité marginale de l'accessibilité est moins fort que celui de l'augmentation de la quantité de sol consommée. Cette hypothèse supplémentaire permet à Alonso d'expliquer à la fois le comportement des ménages dans les villes américaines et dans les villes européennes. Il explique en effet que, dans les villes américaines, une forte préférence pour la consommation de sol conduit les ménages à hauts revenus à se localiser en périphérie : pour un revenu supérieur, le taux de décroissance du rapport des utilités marginales est moins fort que le taux de croissance de la quantité de sol consommée. Au contraire, dans les villes européennes, la taille moyenne des parcelles variant peu (soit pour des raisons de structure des préférences des ménages, soit, comme le fait remarquer Derycke (Derycke, 1982)) du fait de contraintes sur la disponibilité de sol, la faible augmentation de la quantité de sol ne peut pas contrebalancer l'augmentation de la préférence pour la centralité, et les ménages aisés ont donc tendance à se localiser à proximité du centre.

c) Effet d'une augmentation de la population

Une augmentation de population accroît la demande de sol urbain. La frontière urbaine n'étant pas fixe, si, dans un premier temps, on considère les consommations de sol par ménage comme inchangées, la taille de la ville augmente, et la distance de la frontière urbaine au CBD passe de B à B'. A la frontière, la rente foncière est égale à la rente agricole, du fait de la concurrence pour l'utilisation du sol. En conséquence, si la forme des courbes de rente offerte est inchangée, les ménages qui sont localisés à la frontière se trouvent sur une courbe de rente offerte plus élevée, et donc à un niveau d'utilité inférieur. Comme la taille optimale des parcelles est décroissante avec le niveau d'utilité, les ménages vont diminuer leur consommation de sol, d'où une augmentation des densités urbaines et du prix du sol en tout point, qui passe de Px à P'x.

Graphe 45 : Effets d'une augmentation de la population



Source : Masson, 2000

Ainsi, une augmentation de la population urbaine produit un accroissement de la superficie urbaine, une hausse de la rente foncière en tout point, une augmentation des densités urbaines.

4) Critiques et élargissements du modèle d'Alonso

Les principales critiques adressées au modèle d'Alonso tiennent au caractère réducteur des hypothèses concernant la représentation de la ville et du système de transport. En effet, le système de transport est envisagé uniquement par le biais d'une distance au centre. Il est, d'une part, restreint à un seul mode de transport, la voiture, et d'autre part, à un réseau viaire radio-concentrique. La congestion n'est pas prise en compte et les coûts unitaires de transport sont supposés constants. Enfin, le modèle considère uniquement les déplacements domicile-travail.

Le modèle d'Alonso a donné lieu à différents élargissements formant le courant de la Nouvelle Economie Urbaine (NEU). Ces extensions ne remettent pas pour autant en cause les grands résultats du modèle. Cependant, comme le souligne Goffette-Nagot (Goffette-Nagot, 1994), la complexité inhérente à toute analyse spatiale limite le nombre d'hypothèses susceptibles d'être relâchées simultanément.

a) La représentation du système de transport

Les travaux menés dans la continuité de ceux d'Alonso ont permis un représentation du transport urbain plus réaliste, notamment dans le traitement de la voirie, dans la prise en compte du transport comme secteur de production de services, en envisageant la concurrence entre modes de transport, en introduisant la congestion et enfin en considérant un réseau de transport bi-modal.

Wingo (Wingo, 1961) est un des premiers auteurs à avoir amélioré la représentation des transports urbains. Wingo approfondit la prise en compte des effets du système de transport (amélioration de la technologie et de l'offre, étude des coûts généralisés de transport intégrant la valeur du temps de déplacement) sur la distribution spatiale des valeurs foncières et des densités résidentielles. Ses travaux, bien qu'antérieurs à ceux d'Alonso, en sont un complément. D'après Derycke (Derycke, 1982), l'apport de Wingo est double. Premièrement, il permet un meilleur traitement du coût de l'éloignement au centre. En effet, alors que le coût de transport est traité chez Alonso de manière linéaire avec la distance au centre, Wingo considère trois éléments définissant le coût généralisé de déplacement pour une journée de travail. Le premier est la dépense monétaire liée à la longueur des déplacements ; le deuxième est la dépense monétaire liée au nombre des

déplacements ; le troisième est la valeur monétaire du temps de trajet. Le temps de trajet dépend à son tour de plusieurs attributs : de la distance parcourue, de la vitesse de déplacement selon le mode emprunté, du nombre d'usagers du mode de transport et de la capacité d'écoulement du système de transport. Ces deux derniers éléments permettent à Wingo d'étudier les facteurs de congestion du trafic. Le deuxième apport est lié aux difficultés d'estimation de la valeur du temps de trajet.

i) La trame viaire

La plupart des modèles de la NEU considèrent le réseau de transport comme un problème de surface de voirie. Les modèles tentent de déterminer le partage de l'usage des sols dans l'anneau résidentiel entre le logement et la voirie. Selon le degré de sophistication des modèles, ce rapport est envisagé soit comme une constante (à distance donnée du centre), soit comme une variable exogène, soit comme une variable endogène. D'autre part, Alonso considère dans son modèle que les ménages peuvent se déplacer sur les radiales joignant leur lieu de résidence au CBD. Le réseau de transport est supposé suffisamment dense pour que les coûts de transport vers l'axe radial le plus proche soient négligeables. Cependant, il est évident que cela ne correspond pas à la réalité. Certains modèles ont cherché à introduire la possibilité de déplacement sur des anneaux périphériques de contournement, sur lesquels la vitesse peut être différente de celle sur les axes de transport radiaux (Perreur, Thisse, 1974). Krauss (Krauss, 1974) a par exemple tenté, en conservant l'hypothèse d'un seul mode de transport, de compléter le système radial par l'introduction d'un réseau routier circonférentiel. Mais, rapidement, les analyses deviennent complexes et les profils de rente difficiles à déterminer.

ii) Le service de transport urbain

Partant de l'observation que le rapport du capital à l'emprise foncière varie considérablement selon la localisation d'une part, et le secteur d'activité d'autre part, Mills (Mills, 1967) propose un modèle d' « équilibre spatial en production » pour l'ensemble des secteurs productifs intra-urbains. En effet, la construction immobilière (bureaux et logement), le service de transport urbain (privé ou public) et la production industrielle font du sol un usage très différent, plutôt extensif (voirie, pavillons) en périphérie, plutôt intensif (immeuble de bureau, métro) dans la zone centrale de la ville. La rationalité économique semble commander l'usage le plus efficace du sol : là où sa rareté est la plus forte, il supportera les plus forts investissements en capital, tandis que les zones les plus périphériques se caractériseront par des usages plus extensifs. Ce modèle représente selon Gannon (Gannon, 1992) la première tentative de modélisation analytique de l'usage optimal des sols urbains qui s'écarte de la voie tracée par Alonso. En effet, les préférences des ménages ne sont pas envisagées explicitement. Mills leur substitue les fonctions de production de trois secteurs productifs : celui des biens, celui du transport, et celui du logement. Mills adopte alors une logique de production qui le rapproche de Von Thünen et lui permet de déterminer par le biais des rendements d'échelle la même répartition de l'usage des sols que ce dernier : au centre est implanté le secteur monopolistique à technique de production très intensive en sol tandis qu'en périphérie la constance de leur rendement d'échelle associée à la substituabilité de leurs facteurs de production permet aux secteurs « résidentiels » (services liés au logement et à la voirie) d'être indifférents à la distance au centre, donc d'offrir leurs services en tout endroit.

iii) La concurrence entre les modes de transport

Capozza (Capozza, 1973) propose également un modèle d' « équilibre spatial en production ». Mais alors que Mills considère un seul mode de transport, l'automobile, Capozza cherche à préciser l'avantage économique d'une complémentarité entre modes de transport se différenciant par leurs besoins respectifs d'emprise foncière. Le modèle considère deux modes de transport : privé (l'automobile) et public (métro), que les ménages empruntent en fonction de leur lieu de résidence. Réduite à un choix binaire, la dualité modale va permettre à Capozza d'envisager le meilleur usage des sols par le biais de l'intensité capitalistique (en terme d'unité de surface et non par salarié) de chacun des deux modes, privé et public. A la différence de l'automobile, le métro n'utilise pas de facteur sol ; il est sans emprise de surface. Cela suppose que l'on tient pour négligeables les surfaces à l'air libre occupées par les bouches du métro. Le métro, dont l'exploitation nécessite des infrastructures très lourdes, exige relativement plus de capital par unité de service produite que l'automobile. La production du service de voirie combine du capital (nécessaire à la construction et à l'entretien de la

chaussée, d'une part, et à l'acquisition du véhicule ainsi qu'à son entretien d'autre part) et du sol. Ces hypothèses se traduisent donc par deux fonctions de production distinctes. Le prix du service du métro est posé indépendant de la distance, il est forfaitaire. Ainsi, le coût de transport en métro est une fonction linéaire positive de la distance parcourue. Le coût de transport individuel domicile-travail en automobile est, en revanche, une fonction croissante de la rente foncière puisqu'il incorpore une consommation de sol. Ainsi, sachant que la rente foncière sera une fonction décroissante de la distance, il coûtera de plus en plus cher, en terme de coût marginal, d'emprunter la voirie lorsque l'usager se rapproche du CBD (et inversement). Au contraire, le métro sera très économique pour des distances faibles, donc des trajets effectués dans les zones les plus centrales de la ville. Capozza oppose ainsi la « ville routière » à la « ville métro ». La première est moins dense, plus étalée, plus diffuse et plus suburbanisée. En revanche, la seconde est moins rapidement congestionnée. Le gradient de rente foncière sera donc plus convexe dans la première que dans la seconde.

iv) La congestion du trafic

Nous ne discutons ici que des travaux portant sur les effets de la congestion sur les profils de rente, les densités et donc sur les localisations urbaines.

Deux méthodes ont été développées pour prendre en compte la congestion : intégrer un coût de transport fonction de la densité du trafic dans la contrainte budgétaire du ménage ; prendre en compte dans la fonction d'utilité du ménage le temps de loisir, fonction de la densité du trafic. Nous avons vu que Wingo, le premier, définit une fonction complexe de coût de transport tenant compte de la capacité d'écoulement de la voirie. Dans les années 1970, divers auteurs intègrent explicitement la congestion dans les modèles : De Ferranti (De Ferranti, 1971), Solow-Vickrey (Solow, Vickrey, 1971), Solow (Solow, 1972), Dixit (Dixit, 1973), Riley (Riley, 1973) et d'autres. (Masson, 2000).

Derycke et Gannon (Derycke, Gannon, 1990) démontrent que l'introduction de la congestion peut aboutir à des profils de rente foncière non convexes. Ces auteurs expliquent ce résultat par le fait que les ménages tiennent compte des nuisances liées à la congestion dans leurs enchères sur les marchés fonciers et résidentiels et ainsi favorisent la hausse des prix aux endroits où d'une part la congestion induit la perte de temps la plus faible et d'autre part l'économie réalisée sur le plan des nuisances l'emporte sur les dépenses supplémentaires de transport liées à l'éloignement du centre-ville.

b) La distribution spatiale des aménités urbaines et la capitalisation immobilière

Divers travaux ont été développés afin de tenir compte du fait que les choix de localisation résidentielle des ménages se fondent sur d'autres éléments que la seule accessibilité à leur lieu d'emploi. Certains auteurs, dont Alonso lui-même, ont introduit des variables d'externalités dans le modèle standard. Nous présentons brièvement le modèle de localisation des ménages avec aménités et ses conséquences en termes de capitalisation. Le phénomène de capitalisation est un des moyens d'analyse théorique de l'interaction entre urbanisation et transport.

i) Le modèle de choix résidentiel avec externalités

Dans les modèles de choix résidentiel avec externalités (Alonso, 1964 ; Beckerich, 1997 ; Fujita, 1989), les choix de localisation des ménages est alors décrit comme un arbitrage entre trois critères : l'accessibilité au CBD, la taille du logement, et les aménités. Ces dernières sont engendrées par l'environnement naturel et les caractéristiques de voisinage (la sécurité, la qualité des écoles, la proximité d'équipements publics, etc.). L'accessibilité correspond aux coûts pécuniaires et en temps des déplacements. Chaque ménage arbitre entre ces trois facteurs en fonction de ses contraintes de temps et de revenu. Une variable d'aménités est introduite dans la fonction d'utilité des ménages qui s'écrivent alors $U(z,s,E(x))$ avec z l'offre de bien composite, s la taille du logement, et $E(x)$ le niveau d'aménité de chaque localisation x. La variable $E(x)$ représente les externalités produites par les biens publics locaux ou par des agents économiques. Chaque localisation se distingue alors par sa distance au centre et par son niveau d'aménités.

Soit

G(x) : le niveau de la taxe locale,

Y° : le revenu du ménage avant impôt,

T(x) : le coût de transport,

R(x)s : les dépenses de logement pour chaque localisation *x*,

alors le modèle correspond au programme de maximisation suivant :

Max U(z, s, E(x))

sous la contrainte $z + R(x).s = Y° - G(x) - T(x)$

Fujita (Fujita, 1989) suppose une augmentation du niveau d'aménités, $E2 > E1$, toutes choses égales par ailleurs. Il montre alors que la courbe d'indifférence se déplace vers le bas, affichant un niveau d'utilité identique. Ceci signifie que dans un meilleur environnement, la même utilité peut être atteinte avec un plus petit montant de bien composite. La fonction d'enchère augmente avec l'accroissement de la qualité de l'environnement. Par conséquent, les ménages peuvent enchérir de manière plus importante dans un environnement meilleur.

ii) La capitalisation immobilière

Beckerich (Beckerich, 1997) illustre ces arbitrages en prenant l'exemple de la création d'une nouvelle ligne de métro. Celle-ci contribue à modifier l'accessibilité des localisations desservies. Les coûts de transport diminuant, le revenu net pour la consommation du bien composite et pour le logement est plus important. Ceci conduit les ménages, pour un niveau d'utilité constant, à proposer une enchère supérieure. Cette modification d'enchère révèle l'existence d'une certaine préférence pour ce bien public local. Ainsi, un logement à proximité de la station de métro devrait avoir une valeur supérieure après la création de cette nouvelle offre de transport (si des phénomènes d'anticipation n'existent pas). Cette analyse diachronique permet d'étudier la capitalisation dans les valeurs immobilières résidentielles de cette nouvelle offre de bien public local.

La capitalisation immobilière de l'offre de biens publics locaux peut ainsi être définie comme le reflet dans les prix immobiliers de la proximité, de la nature, du niveau d'offre de biens publics locaux. Cette approche permet de mesurer, par l'intermédiaire des enchères des ménages pour les biens immobiliers, les variations d'utilité collective provoquées par l'offre de bien public local. Implicitement, cela suppose que l'offre de biens publics provoque des distorsions sur les différents marchés. Différents travaux ont été développés à ce sujet, notamment sur la capitalisation des gains d'accessibilité (Bajic, 1983 ; McDonald et Osuji, 1995 ; Forest et al, 1996 ; Anas, 1995).

iii) Les préférences spatiales des ménages et la localisation résidentielle
Richardson (1977) et Papageourgiou (1973)

Des études foncières menées dans les années 1960 et 1970 ont montré que le gradient de rente foncière varie considérablement en fonction de la distance au centre. Ces observations remettent en cause le schéma classique de décroissance de la rente foncière à un taux relatif constant issu de la seule rente de localisation.

Richardson (Richardson, 1977) considère qu'il est nécessaire d'introduire d'autres éléments dans la détermination de la rente foncière que la seule rente de localisation pour expliquer des gradients de prix du sol positifs. Richardson avance alors le concept de « rentes d'externalités ». Richardson associe ces rentes d'externalités avec les faibles densités pour lesquelles les ménages peuvent avoir des préférences. Dans le modèle de base, la densité diminue quand on s'éloigne du centre. Les rentes d'externalités sont donc croissantes avec la distance, à des taux qui peuvent être supérieurs au taux de décroissance de la rente de localisation.

Papageorgiou (Papageorgiou, 1973) considère les préférences spatiales en rapport avec la qualité de l'environnement. La qualité de l'environnement est liée aux caractéristiques des lieux qui peuvent avoir un effet positif (les aménités) ou négatif (les nuisances). Il considère alors un modèle dans lequel l'utilité des ménages est fonction de l'abondance d'espace, des loisirs et de la qualité de l'environnement. Deux types de facteurs influencent la qualité de l'environnement : les variables endogènes au modèle, comme la congestion ou la proximité de centres économiques, et les variables exogènes, comme le paysage ou le climat.

5) Les limites

La théorie micro-économique urbaine fournit un cadre d'analyse pertinent pour l'étude des comportements des agents économiques dans la ville. Bien que les hypothèses de travail soient relativement simplistes, **ces modèles permettent d'apporter des éclairages essentiels sur la compréhension des comportements des agents économiques dans la ville, sur les déterminants du choix de localisation des ménages, sur le rôle du transport sur les formes urbaines**. Ils permettent ainsi de tirer certaines conclusions sur les mécanismes d'interaction entre transport et urbanisation. Par ailleurs, les principes mis en oeuvre dans cette approche sont très souvent utilisés dans les modèles dont la visée est plus opérationnelle. C'est le cas, par exemple, de TRANUS qui en adopte les concepts fondamentaux, comme le temps et coût de transport, le prix du sol, l'élasticité de la demande de déplacement et de sol, le revenu des différents acteurs, et peut ainsi recréer les différents scénarios investigués par la micro-économie urbaine. Les ménages sont par exemple caractérisés par leur revenu, ce qui permet à TRANUS de modéliser la dynamique de ségrégation, mais pas sur un espace continu.

Cependant, du fait d'hypothèses trop restrictives, les modélisations issues de la micro-économie urbaine depuis Alonso, et notamment de la Nouvelle Economie Urbaine (NEU) fondée par les travaux de Fujita, n'offrent pas une description de la ville suffisamment conforme à la réalité pour être mobilisées directement dans notre projet de recherche. Les modèles n'ont pas d'application empirique ; ils ne sont pas opérationnels. En effet, cette approche considère une ville unidimensionnelle où les différentes localisations ne se distinguent entre elles que par leur distance au centre. **La conception d'un espace monocentrique et isotrope ne permet de considérer ni la complexité des localisations définies par rapport à plusieurs points, ni l'existence de caractéristiques propres à chaque lieu**. Une des différences fondamentales entre les modèles de la micro-économie et les modèles interactifs comme TRANUS que nous présenterons dans la section suivante est que ces derniers ne sont justement pas monocentriques. Il n'y a pas de localisation économiquement centrale prédéterminée ; tous les types d'activités économiques peuvent se localiser dans toutes les zones urbaines.

C - *Le syncrétisme des ingénieurs et planificateurs*

Cette troisième tradition théorique cherche à expliciter et modéliser les interactions « transport – usage des sols » en ville. Elle relève d'une volonté de planifier le développement de la mobilité. Cette tradition est née après-guerre avec l'explosion de la mobilité qui se porte essentiellement sur l'automobile, le déclin des transports collectifs, l'allongement des distances parcourues et l'éclatement géographique de la distribution des déplacements. Les modèles utilisés ont donc évolué en parallèle avec les orientations et les besoins de la planification urbaine (Masson, 1998). **Un trait marquant de cette tradition est la volonté pragmatique de ne pas inscrire les modèles produits dans une théorie monolithique et solide mais de mobiliser différentes techniques, provenant de différentes approches voire différentes sciences, au risque parfois d'une certaine acrobatie théorique**.

Au sein de cette tradition modélisatrice, il est commun de distinguer deux familles de modèles :

- Les modèles ayant pour objectif d'établir des prévisions de trafic, à partir des tendances actuelles. Ces modèles sont généralement très détaillés spatialement et nécessitent beaucoup de temps pour construire et analyser les résultats des scénarios testés. Ils peuvent être unimodal (un seul mode transport est considéré), multimodal (plusieurs modes de transport sont considérés mais les réseaux sont modélisés séparément) ou intermodal (plusieurs modes de transports sont considérés et les réseaux sont modélisés intégrés). Les modèles de transport conventionnels à quatre temps (UTMS[107]) et les modèles de choix discrets (DCM) constituent cette première famille.

[107] Pour faciliter la lecture nous désignerons dans tout ce chapitre 5 les modèles par leurs acronymes anglais, couramment utilisés dans la littérature anglaise comme française : « Urban Transportation Modelling Systems (UTMS) » pour « modèle conventionnel à quatre temps » ; « Discrete Choice Model (DCM) » pour « modèle de choix discrets » aussi appelés « modèles désagrégés » ; « Strategic

- Les modèles ayant pour objectif d'établir des scénarios contrastés en simulant différentes alternatives politiques : différentes politiques sont testées et leurs effets sont évalués et comparés. Ces modèles sont généralement moins détaillés et permettent de tester une large gamme de politiques alternatives car le temps nécessaire à la construction des scénarios contrastés et l'analyse des sorties des modèles est moindre que pour les modèles de la première famille. De la même façon, ces modèles peuvent être unimodal, multimodal ou intermodal. Les modèles stratégiques (SM) et les modèles interactifs Transport et Usages des Sols (LUTM) constituent cette deuxième famille.

1) Les modèles de transport conventionnels à quatre temps[108] (UTMS)

La « méthode classique à quatre temps » des modèles de transports conventionnels a été mise au point, dans ses grandes lignes, au cours des années 1950 et 1960 (Masson, 1998). C'est à cette époque que l'on est sorti des modèles frustes (facteurs de croissance, courbes empiriques de répartition entre modes de transport, affectation par « tout ou rien »), et que l'on a formulé les principales méthodes d'analyse du choix modal et les concepts de coût généralisé d'un déplacement. La véritable percée méthodologique au début des années soixante, dans le domaine de la planification des transports urbains, tient à plusieurs causes (Masson, 2000) : la volonté, aux Etats-Unis surtout, mais aussi en Europe, de construire massivement des autoroutes urbaines, sous la pression du « lobby » de l'automobile ; le développement des méthodes d'analyse (recherche opérationnelle) et de calculs (gros ordinateur) ; la confiance dans la croissance aussi bien démographique qu'économique. Les UTMS sont aujourd'hui très fréquemment utilisés ; ils sont mobilisés dans environ 95% des études transports menées en France (Clément, 1996). Ces outils ont été orientés vers les problèmes des flux de trafic automobile. Le principal objectif était de planifier les investissements de transport nécessaires aux régions urbaines afin de faire face à la croissance. Ils permettent de prévoir le nombre de déplacement effectués dans une aire urbaine par type (travail, loisir, …), période de la journée (heure de pointe, quotidien, …), couple origine – destination, et modes de transport. Le produit final d'un modèle UTMS est une prévision de flux modaux sur les liens du réseau de transport.

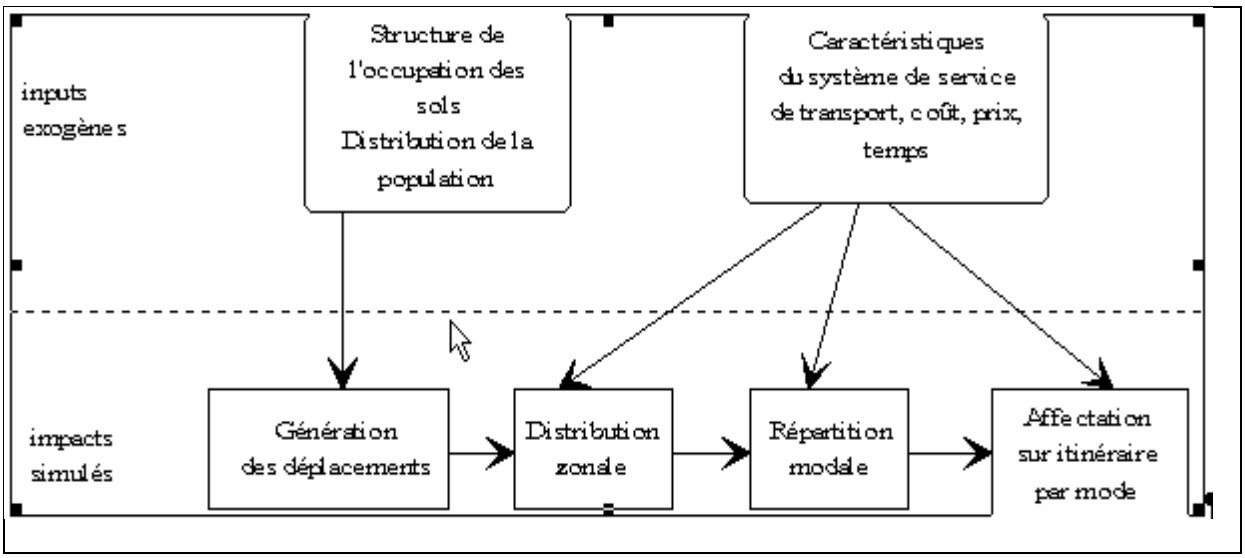
a) Les principes et caractéristiques des modèles conventionnels à quatre temps

Cette approche divise la fonction de demande en déplacements émis et attirés, en quatre sous-modèles de génération, distribution zonale, répartition modale et affectation. Les unités d'observations sont les zones de l'aire d'étude.

models (SM) » pour « modèle stratégique » ; « Land Use and Transport Model (LUTM) » pour « modèle interactif Transport et Usages des Sols ».

[108] Exemple de UTMS : DAVIS (voiture) ; TERESE (Transport en commun) ; POLYDROM (voiture/ Transport en commun) ; VISEM/VISUM (voiture/ Transport en commun) ; TRANPLAN (voiture/ Transport en commun) ; OPERA (voiture/ Transport en commun) ; EMME2 (voiture/ Transport en commun) ; TRIPS (voiture/ Transport en commun) ; MINUTP (voiture/ Transport en commun).

Graphe 46 : Structure standard des modèles conventionnels de déplacements urbains



Source : Masson, 2000

1) L'étape de génération des déplacements

L'objectif de la modélisation de la génération des déplacements est de déterminer le niveau de demande agrégée pour les déplacements en origine et en destination de chaque zone de l'aire d'étude. Ceci est réalisé par motif de déplacement. Il est usuellement supposé que les déplacements émis ou reçus sont uniquement déterminés par des facteurs exogènes : les caractéristiques socio-économiques de la zone d'émission ou d'attraction respectivement. Les équations peuvent alors être écrites de la façon suivante (Masson, 2000) :

Ti = f(Si)

Tj = f(Si)

où *T*i et *T*j représentent les trafics émis par zone *i* et les trafics attirés par la zone *j* respectivement ;

et *S*i et *S*j sont des caractéristiques socio-économiques des zones *i* et *j*.

Les variables décrivant le réseau de transport ne sont généralement pas introduites dans ces modèles. Par exemple, la fréquence de déplacement est supposée indépendante des changements dans le système de transport. Ainsi une politique publique engendrant une modification dans le système de transport n'aura aucun effet sur la fréquence des déplacements. Les modules de génération ne sont donc pas adaptés pour tester des politiques de transport. Afin de rectifier cela, certains modèles ont introduit des variables d'accessibilité généralisée dans les équations de génération de déplacements. La modélisation de la génération des déplacements par zone peut alors être fondée sur des moyennes zonales ou des totaux. D'autre part, le module n'est ni comportemental, ni causal puisqu'il ne présente pas les décisions des personnes confrontées au choix de leur fréquence de déplacement. Les méthodes de régression simples ou multi-linéaires sont fréquemment utilisées pour estimer ce module. (Masson, 2000)

2) L'étape de distribution géographique des déplacements

L'objectif de la modélisation de la distribution des déplacements est de distribuer le nombre total des déplacements en origine de chaque zone parmi toutes les zones de destination possibles. Les entrées du module sont les volumes d'émission et d'attraction des déplacements par zone estimés dans la phase précédente, en relation avec des caractéristiques du service offert par le système de transport entre les deux zones. La matrice de distribution des déplacements peut être désagrégée par motif de déplacement et selon l'heure de la journée. Le module de distribution des déplacements peut être exprimé dans sa forme générale comme suit (Masson, 2000) :

Tij = f(Ti, Tj, Fij)

où *T*ij est le trafic de la zone *i* à la zone *j* ;

et *F*ij est la fonction d'impédance de déplacement entre *i* et *j*, pouvant être définie en fonction de la distance séparant *i* et *j*, du temps de parcours moyen, du coût de transport ou d'une combinaison de ces éléments.

La spécification fonctionnelle utilisée communément dans cette étape est donc le modèle gravitaire. Les modèles gravitaires stipulent que les déplacements de la zone *i* à la zone *j* sont considérés comme étant le produit du total des déplacements émis par la zone *i* et du total de déplacements attirés dans la zone *j*, et en relation inverse avec une fonction de la qualité de service du transport entre les deux zones. Des contraintes linéaires assurent que les sommes des marges de la matrice résultante soient cohérentes avec les émissions et les attractions données, et une procédure itérative peut être utilisée afin d'atteindre cette cohérence interne. Ce modèle a de faibles justifications théoriques. D'autre part ce processus de distribution est plus descriptif que causal dans la mesure où il ne prévoit pas la distribution des déplacements issue des conditions d'un nouvel équilibre qui prévaudrait si le système de transport est modifié.

3) L'étape de répartition modale des déplacements

Le module de partage modal alloue les déplacements pour chaque paire de zone entre les moyens de transport disponibles. Ce module est certainement celui qui est le plus diversifié dans la pratique (Masson, 2000). Cependant, la diversité des modes est souvent ignorée ou appréhendée grossièrement en agrégeant tous les modes en deux catégories : la voiture particulière et les transports collectifs. Les informations nécessaires pour construire un modèle de choix modal sont le partage modal observé, les caractéristiques des populations qui se déplacent, les caractéristiques techniques des modes en concurrence. Le nombre de déplacements distribués entre paire de zones est alloué entre la voiture particulière et les transports collectifs sur la base des temps et coûts relatifs des déplacements par mode. Le module de répartition modale peut être exprimé ainsi (Masson, 2000) :

Tij*auto* / Tij*TC* = f(Fij*auto*, Fij *TC*, Si, LUj)

Ainsi, la part des déplacements entre la zone *i* et la zone *j* allouée à la voiture particulière dépend des fonctions de coûts de transport en voiture particulière (*F*ij*auto*), et en transports collectifs (*F*ij*TC*), et dans certains cas, des caractéristiques socio-économiques de la zone d'origine (*S*i) et des caractéristiques d'occupation des sols de la zone de destination (*LU*j). Cependant, dans les modèles conventionnels les techniques de modélisation et d'estimation adoptées demeurent relativement frustes.

4) L'étape d'affectation sur itinéraire des déplacements

Dans le module d'affectation sur itinéraire, les déplacements d'une zone *i* à une zone *j*, pour un motif donné et pour un mode donné, sont affectés sur une représentation simplifiée du réseau routier ou du réseau des transports publics. Pour les déplacements en véhicule particulier, les déplacements de personnes doivent être convertis en déplacements de véhicule en utilisant un coefficient d'occupation moyenne du véhicule.

Les modules d'affectation sur itinéraire se sont considérablement sophistiqués pendant les années 1960. Les premières modélisations considéraient un unique itinéraire en supposant la capacité de chaque lien du réseau infinie. La méthode consistait à identifier l'itinéraire le moins coûteux et à affecter le nombre total de déplacements à cette route sur la base du principe du « tout ou rien ». L'hypothèse de capacité infinie et celle de l'information parfaite des consommateurs limitaient fortement la pertinence du module : le trafic est entièrement affecté sur les axes routiers présentant le coût minimum, même s'ils sont surchargés. Les contraintes de capacité, basées sur une détermination empirique générique à partir de la relation débit/vitesse, ont donc été introduites dans une procédure itérative afin d'équilibrer les flux de véhicules et les vitesses sur chaque lien du réseau. L'introduction de la contrainte de capacité a progressivement conduit à développer des modèles d'affectation multi-chemins conformes au premier principe de Wardrop selon lequel, en situation de congestion, le trafic se répartit parmi les différentes alternatives d'itinéraire pour une paire Origine - Destination de façon à ce que le temps ou le coût de déplacement devienne égal sur tous les différents itinéraires utilisés. Le résultat est un équilibre qui est optimal du point de vue de chaque usager. Le module d'affectation peut être décrit comme suit (Masson, 2000) :

Tija = f(itinéraire le plus court, capacité)

a) Les limites des modèles conventionnels à quatre temps

Ces critiques se situent à plusieurs niveaux et sont en partie liées les unes aux autres. (Masson, 2000)

i) La cohérence

La demande de déplacements est analysée en utilisant des approches différentes selon les quatre étapes du modèle. La génération des déplacements est usuellement réalisée par des méthodes de régressions linéaires fondées sur des spécifications *ad hoc*, la distribution des déplacements est largement fondée sur les modèles d'interaction spatiale qui reposent généralement sur des formulations gravitaires, le partage modal et l'affectation sont abordés avec des interprétations plus comportementales.

ii) La pertinence

La non prise en compte des interactions « transport – usage des sols »

Le problème principal des modèles conventionnels est évidemment la pertinence par rapport à notre projet de recherche : **les interactions entre le système de transport et le systèmes des usages des sols sont ignorées**.

La remise en cause de la causalité uni-directionnelle

Dans la pratique, **les sous-modèles correspondant à chacune des quatre étapes sont généralement mis en oeuvre de manière rigide et linéaire**, le processus commençant par le calcul du nombre de déplacements générés et/ou attirés et se terminant par l'affectation des flux sur les réseaux de transport. Les effets rétroactifs sont donc négligés. Pourtant les résultats finaux des sous-modèles, tels que le degré de congestion de la voirie, peuvent avoir des impacts importants sur les trois premières étapes, tels que la remise en cause du niveau de mobilité ou des choix modaux.

En fait, la méthode classique est, théoriquement du moins, itérative. Les attributs des réseaux, déterminés à l'issue d'un premier tour d'application des modèles, peuvent être réintroduits dans les modèles de distribution ou de choix modal. En pratique, ce processus itératif est souvent simplifié ou négligé. (Masson, 2000)

La remise en cause de la séquentialité

La procédure repose sur une méthode de modélisation dite à quatre étapes. Si ce schéma présente un certain nombre de commodités pour le planificateur, on est en droit de se demander s'il est réaliste. Un usager se trouve-t-il confronté à une telle succession de choix ? La décision de se déplacer est-elle réellement indépendante de la destination choisie, du mode de transport préféré ou même de l'itinéraire envisagé ? **L'analyse comportementale des décisions de déplacement est très frustre dans les modèles conventionnels.**

L'agrégation des données

La procédure classique opère à partir de données agrégées, la plupart du temps selon un critère géographique. **L'introduction de comportements moyens qui en découle tend à masquer la grande hétérogénéité des attitudes des ménages ou des individus face aux déplacements**. Ce principe n'affecte pas uniquement les variables de demande. Certaines variables d'offre n'échappent pas non plus à une certaine réduction de la réalité. Domencich et McFadden (Domencich, McFadden, 1975) estiment que ces modèles ne sont pas fondés sur une théorie cohérente des comportements de déplacements.

L'inadaptation aux prévisions de long terme

Faute de disposer de séries temporelles, le calibrage des modèles se fait grâce à des coupes instantanées ; les modèles conservent alors les rapports actuels. De ce fait, **ils ne sont guère adaptés à produire des prévisions de long terme**. Ce sont des modèles statiques, et la mise en œuvre des rétroactions entre les étapes de simulation est très lourde; le contexte urbain (structure d'occupation des sols, distribution géographique de la population,…) n'est pas pris en compte, il est exogène.

iii) La mesurabilité

La succession des différents modèles, l'importance des calculs impliqués, mais aussi les données nécessaires et les enquêtes à effectuer conduisent à des modèles dont la manipulation se révèle être lourde.

Afin de dépasser ces limites, deux voies de recherche se sont développées. La première s'est focalisée sur une meilleure prise en compte des comportements individuels et a débouché sur le développement des modèles de choix discrets (DCM). La deuxième s'est focalisée sur la prise en compte des interactions et rétroactions entre le système de transport et le système d'usage des sols et a débouché sur le développement des modèles stratégiques (SM) et des modèles interactifs (LUTM).

2) Les modèles de choix discrets[109] (DCM)

Ces critiques des modèles conventionnels de transport ont conduit au développement des modèles comportementaux de demande. Les premiers travaux ont été menés par McFadden (McFadden, 1973) et Ben-Akiva (Ben-Akiva, 1973) qui ont formulé les problèmes de choix du mode de déplacement et de la destination comme des problèmes de choix du consommateur micro-économique parmi des alternatives discrètes. Deux objectifs principaux peuvent être distingués (Raux, 1983). Le premier est de construire des modèles plus sensibles que les modèles agrégés aux variables techniques du système de transport - vitesse, coût, qualité de service. Cet objectif est relié à la gestion technique du système des transports. Le deuxième, plus général et plus ambitieux, est de construire des modèles capables de mieux représenter le comportement des individus dans le système des transports. Il rejoint partiellement le premier objectif dans la mesure où la recherche de la sensibilité des modèles aux variables de niveau de service passe par l'analyse du comportement des individus.

Le développement des modèles de choix discrets (DCM) répond à la nécessité de passer à une approche causale des phénomènes. Un modèle comportemental implique la représentation des choix individuels lorsque les usagers des transports sont confrontés à des alternatives. Les choix relatifs au déplacement sont la fréquence du déplacement, l'heure de déplacement, la destination, le mode de transport et l'itinéraire.

Les modèles DCM sont peu souvent utilisés en France ; des expériences ont été menées à Nantes, Grenoble, Rennes mais seul la RATP à Paris continue à en employer un. (Clément, 1996). Dernièrement De Palma (De Palma, 1996) a développé un DCM dynamique, METROPOLIS, décrivant de manière endogène les variations de l'offre de transport et de la matrice Origine-Destination au cours de la journée.

a) Les principes des modèles de choix discrets

Les modèles de choix discrets se distinguent des modèles conventionnels à quatre étapes de deux façons. D'une part, l'analyse est effectuée au niveau du décideur plutôt qu'à partir des flux zonaux. D'autre part, ces modèles se fondent sur la théorie micro-économique du comportement du consommateur, plutôt que sur la base de spécifications ad hoc (Masson, 2000).

Les modèles de choix discrets sont des modèles probabilistes permettant de décrire le processus de décision d'un individu à un instant donné : ils calculent la probabilité, pour un agent économique, d'effectuer une sélection « parmi un ensemble limité d'éventualités mutuellement exclusives » (Masson, 2000). Ainsi, l'approche de choix discrets raisonne par rapport à un individu *t* ayant des caractéristiques socio-économiques et de différenciation des offres de transport qui lui sont propres, qui font qu'il est intrinsèquement différent de tout autre individu. La modélisation désagrégée renvoie à la mesure du poids des variables intervenant dans le processus de décision des individus. Elle permet

[109] Exemples de DCM : ALOGIT, MVLOGIT, TRIO, HIELOW, FIDELIO, METROPOLIS.

de comprendre leurs logiques de comportements de déplacement en matière de choix discret simple (mode de transport, par exemple) ou combiné (choix du mode et de la destination, par exemple). La notion de choix discret renvoie donc à un ensemble d'alternatives dénombrables. Pour ce faire, on associe, à chaque alternative constituant l'ensemble étudié, une fonction d'utilité qui dépendra essentiellement des individus et des caractéristiques de l'alternative elle-même. Les résultats se présentent sous forme de probabilités. Grâce à elles, on obtient le niveau de la demande de déplacements futurs (par mode si le choix concerne les modes), compte tenu des tests de politiques de transport qui ont été effectués en faisant varier les composantes des fonctions d'utilité.

Les modèles de choix discrets sont fondés sur le concept de l'utilité aléatoire. Cette théorie considère que l'utilité du consommateur *t* qui choisit l'option *i* contient à la fois une composante systématique $V_i{}^t(Xi,St)$ (qui est l'utilité moyenne de l'alternative *i* pour l'individu *t* associé aux caractéristiques socio-économiques *St*) et une composante non observable $\varepsilon(X'_i, S_t)$. La fonction d'utilité aléatoire s'exprime de la façon suivante (Masson, 2000) :

$$U_i^t = V_i^t(X_i, S_t) + \varepsilon(X'_i, S_t)$$

où X_i et X'_i représentent les attributs respectivement observables et non observables de l'alternative *i*.

Si le consommateur effectue le choix *i*, nous supposons que U^t_j est l'utilité maximale parmi les *j* utilités où *j=1...J*. Ainsi, le modèle statistique est défini par la probabilité que le choix *i* soit effectué. Cette probabilité est donnée par :

$$P_i^t = \Pr[V_i^t + \varepsilon_i^t \geq V_j^t + \varepsilon_j^t]$$

$$P_i^t = \Pr[\varepsilon_i^t - \varepsilon_j^t \geq V_j^t - V_i^t]$$

Le modèle est rendu opérationnel par un choix particulier de la distribution des composantes aléatoires de la fonction d'utilité. Le moyen le plus simple d'obtenir une solution à P_i^t est de supposer une distribution de Weibull (appelée également distribution double exponentielle) des aléas $\varepsilon(X'_i, S_t)$. Ce type de distribution conduit aux modèles logit. D'autres hypothèses peuvent être faites sur les composantes aléatoires de la fonction d'utilité. Le modèle logit prend la forme suivante :

$$P_i^t = \frac{\exp[V_i^t(X_i, S_t)]}{\sum_j \exp[V_j^t(X_j, S_t)]}$$

où P_i^t est la probabilité que l'individu *t* choisisse l'alternative *i* ; *X* et *S* sont deux vecteurs représentant les attributs de l'alternative *i* et les caractéristiques de l'individu *t*.

La formulation logit est pratique. En particulier, elle peut être calibrée relativement facilement. Une des caractéristiques majeures de cette formulation logit est l'hypothèse d'indépendance des alternatives non associées (*independance of irrelevant alternatives* (IIA)). Cela entraîne que l'estimation des coefficients ne sera correcte que si la distribution des variables est indépendante des choix effectués par les individus. La propriété IIA est liée au fait que la probabilité relative qu'un individu *t* choisisse l'alternative *i* plutôt que l'alternative *j* ne dépend que des caractéristiques des alternatives *i* et *j*.

$$\frac{P_i^t}{P_j^t} = \frac{e^{V_i^t}}{e^{V_j^t}}$$

La probabilité relative de choix (entre *i* et *j*) est donc indépendante des autres alternatives disponibles : tant que les valeurs de V_i^t et de V_j^t ne changent pas, la probabilité relative ne changera pas, au regard des autres alternatives qui sont ajoutées ou supprimées de l'ensemble de choix. Cette propriété présente certains avantages et inconvénients qui seront discutés par la suite (cf. III.B.2b).

Les modèles comportementaux désagrégés de la demande de déplacements présentent un certain nombre d'avantages sur les modèles conventionnels. Premièrement, ils ont des fondements théoriques, ce qui procure une base pour modéliser les comportements de déplacements de façon cohérente. Deuxièmement, les modèles de comportement de demande sont plus adaptés à tester des mesures de politiques. Les élasticités directes et croisées peuvent être utilisées pour simuler les effets de changement à la fois induits par des variables de prix et des variables hors prix. Un troisième avantage est que les implications en termes de bien-être des changements de mesures politiques peuvent être évaluées à l'intérieur du système.

b) Les limites des modèles de choix discrets

Raux (Raux, 1983), sur la base des critères d'opérationnalité définis par Bonnafous (Bonnafous, 1972), souligne les principales carences des modèles à choix discrets.

i) La cohérence des DCM

La cohérence avec les objectifs du modèle implique un centrage du modèle sur les variables techniques du système de transport que sont le coût et la durée plus ou moins décomposés des déplacements. Ces variables doivent entrer dans le modèle sous leur forme mesurée objectivement. Cette nécessité entre en conflit simultanément avec les conditions de mesurabilité et de pertinence du modèle. Si ces variables sont reconstituées au niveau individuel à partir de caractéristiques du réseau telles que coûts ou vitesses moyennes, elles introduisent des erreurs risquant de nuire à la qualité des résultats du modèle qui repose sur la précision de la mesure des durées des trajets élémentaires. De plus, l'utilisation de telles variables zonales est en contradiction avec la détermination, nécessaire au plan théorique, des variables au niveau individuel. En outre, une approche pertinente suppose que le modèle se fonde sur les variables telles qu'elles sont perçues par l'individu. Ce sont celles qui lui permettent d'évaluer son niveau d'utilité pour se mettre en accord avec les fondements théoriques du choix. Mais l'utilisation de telles variables entre en conflit avec les objectifs des variables du système de transport. Une position pragmatique consisterait à dire que le modèle représente à la fois la formation des perceptions de ces variables physiques et les réactions à ces perceptions. Cette position laisse toutefois entier le problème du passage de ces valeurs objectives aux valeurs perçues, qui serait saisi sous la forme d'une « boite noire » par le modèle, l'exposant à de graves erreurs de prévision dans le cas d'une modification des mécanismes de perception. La résolution de ce problème apparaît comme la condition pour l'élaboration d'un modèle de comportement en accord avec la théorie du choix individuel. (Le Nir, 1991)

Enfin, les relations entre les variables socio-économiques caractéristiques des individus et les variables relatives au système de transport sont fondées sur des observations en coupe instantanée. Ainsi, si elles permettent d'estimer les effets de mesures de court terme, en revanche, elles rendent hasardeuse toute prévision à un horizon plus lointain.

ii) La pertinence des DCM

Les problèmes de pertinence sont liés au fait que la formalisation mathématique nécessite un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. A l'origine, l'hypothèse la plus critiquée est celle de l'indépendance des alternatives non associées posée par l'utilisation du modèle logit. Cette difficulté a cependant été dépassée par une proposition de Ben-Akiva (Ben-Akiva, 1973) consistant à modéliser le processus de choix selon une procédure emboîtée à plusieurs étapes[110]. Ensuite, la maximisation de l'utilité par individu ne permet pas de prendre en considération les contraintes relationnelles auxquelles il peut être soumis, en particulier au sein de son ménage (emmener les enfants à l'école avant d'aller au travail, etc.).

D'autre part, le problème principal par rapport à notre projet de recherche est évidemment **la non-prise en compte des interactions entre le système de transport et les systèmes des usages des sols.**

[110] Nous présentons cette proposition de Ben-Akiva dans la sous-section III.B.2.b

Enfin, pour des raisons de mesurabilité exposées ci-dessous, ces modèles désagrégés répondent principalement à une problématique de planification à court terme.

iii) La mesurabilité des DCM

Le respect du critère de mesurabilité est subordonné à deux éléments : le premier est constitué par la mesure individuelle des caractéristiques des alternatives ; le second est lié à la définition de l'ensemble des alternatives de choix. Le premier élément est soumis à la condition de la cohérence du modèle avec ses objectifs. Quant au second, la détermination de l'ensemble des alternatives qui s'offrent à l'individu est cruciale sur le plan de la cohérence du modèle : pour chacune des alternatives de l'éventail de choix associé à l'individu, la probabilité de choix doit être non nulle. Or, on ne fait qu'observer des choix révélés et non des probabilités, ce qui implique une inférence à partir des observations sur l'éventail des alternatives offertes : le regroupement d'individus ayant des éventails de choix différents, ce qui suppose du point du vue théorique des modèles de choix différents, modifie la valeur de la fonction de vraisemblance associée et introduit une erreur dans l'estimation des paramètres du modèle.

3) Les modèles stratégiques[111] (SM)

L'objectif des modèles stratégiques est d'être capable à l'échelle d'une agglomération de simuler les conséquences de politiques de transport variées, sous des hypothèses contrastées de développement urbain, socio-économique et démographique. **Leur spécificité est de modéliser les rétroactions dans le système de transport**. Ils rendent compte des réactions des usagers suite à des variations dans les conditions de transport : modification de l'itinéraire, du mode ou de la destination du déplacement. Ils simulent donc les rétroactions de l'état de l'offre sur la demande.

Les SM sont basés sur la structure séquentielle des UTMS mais tendent à être plus simples d'usage (Clément, 1996). C'est un point important car un de leurs objectifs est de faciliter l'usage de modélisation dans les processus de planification urbaine (Clément, 1996). Ces modèles fonctionnent en effet avec un nombre de zones réduit et une représentation de l'offre de transport non pas sous la forme traditionnelle d'un réseau, mais par des relations flux-vitesse entre zones.

La structure générale d'un modèle stratégique obéit aux règles suivantes (Bates et al, 1993). Les modifications de la demande de transport sont provoquées d'une part par des variables exogènes au modèle (effets dus à l'utilisation des sols, des revenus, de la possession de la voiture particulière) et d'autre part par des variations des conditions de transport, exprimées au travers de l'évolution des coûts généralisés. Ainsi, les matrices Origine-Destination et la répartition modale des déplacements peuvent être modifiées lorsque les conditions de transport changent. Les modèles stratégiques prennent en compte l'ensemble du système de transport, c'est-à-dire les modes privés et les modes publics et les interactions entre ces modes. Par contre, l'évolution du système des usages des sols, les revenus et les taux de motorisation restent exogènes.

Le concept de modèle stratégique n'est pas nouveau puisque, par exemple, le modèle QUINQUIN a été développé dans les années 80 (Tabourin, 1989). Par la suite, de nombreux modèles stratégiques ont été élaborés au Royaume-Uni dans le cadre d'études de transport, notamment à Londres (Oldfield, 1993), à Birmingham (Jones, 1990) et à Edimbourg (Bates et al., 1993). Un modèle stratégique a été élaboré sur l'agglomération lyonnaise (Masson, 1995 ; Raux et al., 1996), mais les SM sont relativement peu utilisés en France (Clément, 1996).

[111] Exemples de SM : START, QUINQUIN.

4) Les modèles interactifs « transport – usage des sols » (LUTM)

Dès les années 1960 mais surtout à partie des années 1980, toujours dans une optique d'améliorer la pertinence des modèles de transports urbains, un courant de recherche sur les modèles intégrés[112] de transport et de localisation s'est développé. Sa principale originalité est d'examiner les interactions entre le système de transport et le système des localisations sur le long terme.

Cette famille de modèle est fondée sur le principe de l'interaction spatiale[113] et la dualité entre les décisions de localisation et la demande de transport. Elle intègre en un seul macro-modèle urbain les composantes des différentes décisions de localisations : résidentielles et productives, industrielles et de services, sur la base de leurs interactions complexes. Le premier modèle de cette famille a été proposé en 1964 par Lowry pour la ville de Pittsburgh. Lowry (1964) construit son modèle METROPOLIS afin d'une part d'évaluer les effets des décisions publiques (concernant le développement urbain, les taxes, les contrôles de l'occupation des sols, les investissements de transport) sur la forme métropolitaine, et d'autre part de prévoir les changements des formes métropolitaines au cours du temps, qui sont la conséquence de changements actuellement visibles ou anticipés dans des variables clés telles que la structure des emplois basiques[114], l'efficacité du système de transport, ou la croissance de la population.

Il est important de noter que le développement des LUTM s'est fait en réaction aux insatisfactions engendrées par les modèles micro-économiques (Clément, 1996). Cela permet de comprendre pourquoi les auteurs des LUTM se sont intéressés à de nouvelles techniques de modélisation et ont cherché, ensuite, à les organiser dans un cadre cohérent, en lien avec les approches proprement « transport » et bien établie dans les UTMS. Progressivement, les modèles interactifs ont réussi à mettre en relation deux disciplines auparavant séparées : l'économie des transports et l'économie urbaine. Les LUTM puisent à la fois dans les modèles de prévision de la demande de transport et dans différentes traditions de modélisation du développement urbain : les modèles de la micro-économie urbaine et les modèles d'interaction spatiale qui s'appuient sur des analogies aux sciences physiques.

Les modèles intéractifs de transport et d'occupation des sols se fondent sur le concept que l'interaction des activités dans l'espace induit la demande de transport ; en retour, l'accessibilité qui résulte de l'équilibre entre la demande et l'offre de transport conditionne la localisation des résidents et des activités. Les modèles interactifs comportent généralement trois modules :

- un module « transport » définit, à système de transports donné, et à localisation des activités et des résidences donnée, les flux de transport et les coûts de transports. C'est l'équilibre du marché des transports.

- un module « développement urbain ». La procédure la plus fréquemment mise en oeuvre part de l'existence d'une activité dont le niveau est exogène et qui est appelée activité de base ; les autres activités voient leur niveau déterminé par des tableaux entrées-sorties qui fixent les niveaux de production des autres secteurs nécessaires pour assurer le niveau de production, fixé de façon exogène, du secteur de base, ainsi que les niveaux d'emploi nécessaires.

- un module « utilisation des sols » détermine les localisations des activités et des individus. C'est à ce niveau que les modèles diffèrent le plus fortement entre eux.

La représentation du système d'occupation des sols est généralement simplifiée et se focalise sur les composants qui interagissent directement avec le système de transport. Les sous-modèles d'occupation des sols ont pour objectif d'expliquer de quelle façon les choix spatiaux sont effectués

---

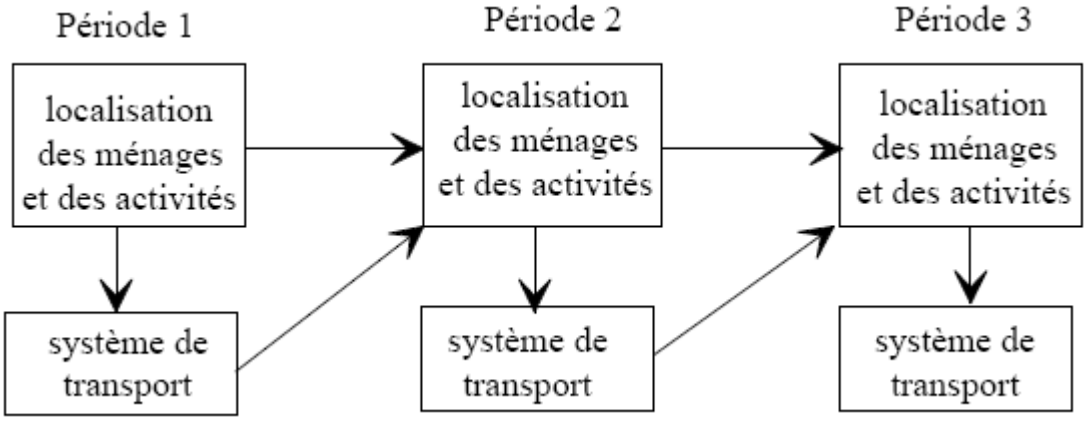
[112] Nous emploierons indifféremment les deux dénominations de ces modèles : « modèles intégrés de transport et d'occupation des sols » et « modèles interactifs de transport et de localisation ».

[113] Le principe d'interaction décrit les rapports établis entre les différentes parties de la ville et les activités respectives (Camagni, 1996). Nous discutons ce principe de l'interaction spatiale et ses modélisations dans la section III.B. de ce chapitre.

[114] Dans la théorie de la base développée par Hoyt (Hoyt, 1954), les emplois basiques correspondent aux secteurs exportateurs s'adressant à une demande externe à la ville. Nous présentons la théorie de la base dans la sous-section III.B.1. de ce chapitre.

pour les localisations résidentielles et les emplois. Ils sont, dans l'ensemble, spécifiés comme une fonction, parmi d'autres facteurs, de l'accessibilité, qui dépend en retour de l'attractivité zonale et des coûts de transport. La distribution spatiale des résidents et des entreprises est supposée engendrer la majorité de la demande de déplacements, qui conduit le développement du système de transport. L'équilibre entre l'offre et la demande de déplacements détermine les coûts de transport et les conditions d'accessibilité, qui à leur tout alimentent le système d'occupation des sols en influençant la localisation des activités et les flux correspondants. Ainsi, les systèmes d'occupation des sols et de transport sont intégrés à travers le mécanisme de rétroaction entre les deux systèmes. Le système d'urbanisation alimente le système de transport avec les estimations du volume et des localisations des activités génératrices de déplacements. Le système de transport affecte le système d'urbanisation par le biais de la notion d'accessibilité, souvent d'une façon temporellement retardée. En effet, dans la plupart des modèles, ce *feed-back* est retardé : les accessibilités de la période 1 affectent les localisations des activités et des individus dans la période 2.

Graphe 47 : Les relations dynamiques entre le système des transports et les systèmes d'occupation des sols.



Source : Masson (1998), d'après De la Barra (1996).

Dans la section suivante, nous étudierons en détail les techniques mobilisées par cette famille de modèle, la diversité des modèles produits et leur opérationnalité.

D - *Conclusions*

Compte tenu des critères requis pour le choix de l'outil de simulation adapté à notre projet de recherche, nous décidons de nous orienter vers les modèles interactifs « transport – usage des sols ». En effet, seuls les LUTM permettent à la fois de prendre en compte le long terme, de simuler les interactions entre le système de transport et le système d'usage des sols, d'intégrer le regard macro-géographique et d'évaluer les effets des politiques alternatives de transport, d'urbanisme et économiques.

Nous étudions ces modèles en détail dans la section suivante.

III - Les modèles interactifs « transport – usage des sols »

Il existe dans la littérature de nombreuses typologies des modèles interactifs « transport – usage des sols ». Certaines comparent les modèles à la description d'un modèle « idéal » et adoptent une approche normative et prescriptive sur ce qui devrait être. D'autres au contraire comparent les modèles existants selon une approche purement descriptive de ce qui est. Nous adoptons la deuxième approche qui décrit les modèles existants.

Dans cette section, nous présentons les modèles interactifs opérationnels existants en croisant différentes typologies rencontrées dans la littérature, notamment celles de Wegener (Wegener, 1994), de Clément (Clément, 1996), de Simmonds, Echenique et Bates (Simmonds, 1996 ; Simmonds, Echenique Bates, 1999), de Masson (Masson, 1998 ; 2000) et de l'Agence pour le Protection de l'Environnement (EPA, 2000) et de Waddell (Waddell, 2001). Enfin, nous critiquons ces différents modèles au travers du filtre des trois critères proposés par Bonnafous (Bonnafous, 1972) que nous avons présentés et adaptés à notre projet de recherche dans la première section de ce chapitre. Cette description analytique nous conduira à choisir TRANUS comme le modèle interactif le plus adapté à notre projet de recherche.

Auparavant, pour une meilleure compréhension, nous souhaitons présenter brièvement la pluralité des modèles interactifs et les différentes techniques de modélisation utilisées par ces modèles.

A - *Pluralité des modèles interactifs*

Depuis les années 1970, un grand nombre de modèles interactifs très divers a été élaboré par différentes équipes scientifiques dans différents pays.

Cette diversité se retrouve à différents niveaux. Elle concerne l'objectif même du modèle (ce qui conditionne par ailleurs son architecture et ses caractéristiques), mais également les bases théoriques sur lesquelles se fondent les modèles, les techniques de modélisation, *etc*.

Les modèles interactifs développés sont :

BOYCE	Modèle combiné de localisation et de choix de déplacement développé par Boyce (Boyce et al. 1983, 1985; Boyce et al. 1992).
CUFM	Le California Urban Futures Model développé par l'université de California à Berkeley (Landis 1992, 1993, 1994; Landis and Zhang, 1998, 1998);
DELTA/START	Le modèle d'usage des sols DELTA by Davids Simmonds Consultancy, Cambridge, UK lié avec le modèle de transport START développé par MVA Consultants et l'Institute of Transport Studies (ITS) de l'université de Leeds (Simmonds and Still, 1998; Simmonds, 1999, 2001);
DSCMOD	Le modèle d'usage des sols développé par Simmonds (1991)
HUDS	Le modèle Harvard Urban Development Simulation développé par Kain and Apgar (1985);
ILUTE	Le modèle Integrated Land Use, Transportation, Environment développé au Canada par Miller et Salvini (Miller and Salvini, 2001);
IMREL	Le modèle Integrated Model of Residential and Employment Location développé par Anderstig and Mattsson (1991, 1998);
IRPUD	Le modèle développé par Wegener pour la region urbaine de Dortmund (Wegener, 1982, 1982, 1985, 1986; Wegener et al. 1991; Wegener, 1996, 1998b);
ITLUP	Le modèle Integrated Transportation and Land Use Package développé par Putman (1983, 1991, 1998) combinant le modèle de localisation résidentielle DRAM et le modèle d'emploi EMPAL;
KIM	Le modèle non-linéaire d'équilibre urbain développé par Kim (1989) et Rho (Rho, Kim, 1989);
LILT	Le modèle Leeds Integrated Land-Use/Transport développé par Mackett (1983, 1990, 1991, 1991);

MEPLAN	Le modèle développé par Marcial Echenique & Partners (Echenique et al., 1969; Echenique, Williams, 1980; Echenique, 1985; Echenique et al., 1990; Hunt, Echenique, 1993; Hunt, Simmonds, 1993, Williams 1994; Hunt 1994);
METROSIM	Le modèle d'usage des sols et transport développé par Anas (Anas, 1992; Anas, 1994, 1998);
MUSSA	Le modèle '5-Stage Land-Use Transport Model' développé pour Santiago de Chile par Martinez (Martinez, 1991, 1992, 1992; Martinez, Donoso, 1995; Martinez, 1996, 1997, 1997);
POLIS	le modèle Projective Optimization Land Use Information System développé par Prastacos pour l'association Bay Area Governments (Prastacos, 1986; Caindec, Prastacos, 1995);
RURBAN	Le modèle d'utilité aléatoire URBAN développé par Miyamoto (Miyamoto et al., 1986; Miyamoto, Kitazume, 1989; Miyamoto, Udomsri, 1996);
STASA	Le modèle développé par Haag (1990);
SALOC	Le modèle d'optimisation des localisations résidentielles ;
TLUMIP	Le modèle de transport et usages des sols de l'état d'Oregon développé dans le cadre du programme Oregon Transport and Land Use Model Integration Program (ODOT, 2002);
TOPAZ	Le modèle d'optimisation de la distribution des emplois et des logements développé par Brotchie, Sharpe et Toakley (1970)
TRANUS	Le modèle de Transport et Usages des Sols développé par de la Barra (de la Barra, 1982; de la Barra et al. 1984; de la Barra 1989, 1998);
TRESIS	Le modèle Transportation and Environment Strategy Impact Simulator développé par Hensher et Ton (2001);
URBANSIM	Le modèle micro-économique de localisation des ménages et des activités développé par Waddell (1998a, 1998b, 2002; Waddell et al., 1998).

Nous ne discutons pas ici en détail de tous ces modèles, mais seulement de ceux reconnus par la littérature, que cette reconnaissance provienne de leur apport théorique ou du nombre d'application auquel ils ont donné lieu.

De même, nous ne discuterons pas ici des modèles de micro-simulation, des modèles d'automates cellulaires et des modèles multi-agent. Profitant de l'accroissement des performances de calcul des ordinateurs, ces techniques de modélisation se sont développées pour répondre aux imprécisions générées par l'agrégation. Elles cherchent à mieux appréhender les comportements individuels d'adaptation aux politiques urbaines et les effets locaux fins des activités et transports. Malheureusement, ces modèles sont encore en phase de recherche et développement, et la littérature s'accorde pour estimer qu'ils ne sont pas opérationnels aujourd'hui. Notre projet de recherche n'est pas de développer de nouvelles méthodes de modélisation, mais de tester la capacité des technologies existantes - techniques mais aussi organisations et donc outil d'aide à la décision – à mettre en place des stratégies de réduction des consommations énergétiques sur le temps long.

1) Des objectifs différents

Les modèles intégrés d'urbanisation et de transport peuvent être en première analyse classifiés en deux groupes distincts : les modèles de prévisions et les modèles d'optimisation.

Les modèles de prévision ont pour objectif de prévoir les effets des politiques de transport et d'urbanisme sur la structure urbaine. Ils s'intéressent à l'explication des changements dans les systèmes de transport et d'usage des sols et à l'évaluation des effets d'un changement dans les variables exogènes ou dans les mesures imposées sur ces systèmes. Ils sont fondés sur un ensemble de relations comportementales.

Les modèles d'optimisation ont pour objectif d'optimiser les grandes lignes du processus de structuration urbaine au regard d'un objectif ou d'un ensemble d'objectifs. Ils sont utilisés pour évaluer les effets d'une politique particulière ou d'un ensemble de politiques sur la fonction objectif.

2) Les spécificités de représentation

Les caractéristiques de représentation renvoient au niveau de désagrégation des variables, à la façon dont sont pris en considération l'espace et le temps. Ainsi, les individus statistiques considérés dans les modèles peuvent être représentés soit de façon très agrégée (on considère alors la valeur comportementale moyenne), soit très désagrégée (les individus sont classés en catégories selon des critères divers). En ce qui concerne la représentation de l'espace, étant donné la complexité des schémas d'occupation des sols et des déplacements, les fonctions spatiales continues ne peuvent être utilisées que pour représenter des villes très simplifiées. L'approche la plus adaptée pour représenter la structure spatiale d'une ville dans un objectif d'opérationnalité est de diviser l'aire urbaine en zones discrètes. Différents niveaux de découpage peuvent alors être adoptés allant d'un découpage très macroscopique à un découpage très fin. En outre, selon les étapes, les modèles peuvent avoir recours à des niveaux de découpage différents (passage par technique d'agrégation).

La plupart des modèles interactifs visent à intégrer une dimension dynamique. Celle-ci est relative au type de représentation du temps prise en compte dans le modèle. Certains modèles recherchent une structure d'équilibre statique, d'autres sont dans un processus d'équilibre dynamique. Enfin, certains modèles représentent un processus évolutif non équilibré. Certains de ces modèles fonctionnent en « pas à pas », ce qui rend possible l'introduction de boucles rétroactives afin de rendre compte des comportements dynamiques à travers le temps.

3) Les sous-systèmes urbains pris en compte

Comme nous l'avons vu dans la section précédente, Wegener (Wegener, 1994) distingue huit sous-systèmes composants le système urbain : les réseaux, l'usage des sols, les lieux d'emploi et de résidence, l'emploi, la population, les déplacements et le transport des biens. Tous les modèles interactifs ne prennent pas en compte ces huit sous-systèmes.

Tableau 53 : Les sous-systèmes urbains pris en compte dans les différents modèles interactifs

modèles	réseaux	Usages des sols	Lieux d'emploi	résidences	emploi	population	Transport de biens	déplacement
BOYCE	+				+	+		+
CUFM		+	+	+	+	+		
DELTA/START	+	+	+	+	+	+	+	+
HUDS				+	+	+		
ILUTE	+	+	+	+	+	+	+	+
IMREL	+	+	+	+	+	+		+
IRPUD	+	+	+	+	+	+		+
ITLUP	+	+			+	+		+
KIM	+				+	+	+	+
LILT	+	+	+	+	+	+		+
MEPLAN	+	+	+	+	+	+	+	+
METROSIM	+	+	+	+	+	+		+
MUSSA	+	+			+	+		+
POLIS		+			+	+		+
RURBAN		+			+	+		+
STASA	+	+	+	+	+	+	+	+
TLUMIP	+	+	+	+	+	+	+	+
TRANUS	+	+	+	+	+	+	+	+
TRESIS	+	+		+	+	+		+
URBANSIM		+	+	+	+	+		+

Source: Wegener, 1994

4) Les spécificités de structure des modèles

Simmonds Echenique et Bates (Simmonds, Echenique, Bates, 1999) font une distinction entre les modèles « pleinement intégrés » et ceux qui sont « connectés » :

- Les modèles « pleinement intégrés » sont fondés sur une unité théorique qui lient tous leurs différents sous-modèles. Ils possèdent donc une certaine rigueur théorique. Par exemple, TRANUS et MEPLAN sont des modèles pleinement intégrés.

- Les modèles « connectés » (ou « composites ») considèrent la ville comme un système hiérarchique de sous-systèmes connectés, mais dont le fonctionnement propre à chacun est structurellement autonome de celui des autres. URBANSIM, par exemple, est un modèle connecté.

B - *Les différentes techniques de modélisation utilisées par les modèles interactifs*

Les modèles intégrés de transport et d'usage des sols mobilisent des techniques de modélisations différentes qu'ils agencent selon une structure cohérente qui leur est propre. Aussi il apparaît pertinent d'étudier ces techniques dans un premier temps avant de comparer les modèles interactifs proprement dits.

Nous résumons ci-dessous ces différentes techniques avant d'en faire fournir un exposé plus approfondi.

Le premier modèle interactif visant l'opérationalité est celui de Lowry (Lowry, 1964) qui consiste en la fusion de deux hypothèses théoriques :

- la théorie de la base économique (Hoyt, 1954) qui divise les activités d'une agglomération en deux catégories : les activités de base destinées à l'exportation et les activités induites destinées aux besoins des populations locales. La théorie de Hoyt permet d'estimer deux variables liées à la base économique, la population résidente et l'emploi dans le secteur des services,

- le principe d'interaction spatiale, sous la forme de deux modèles de potentiel gravitationnel à contrainte unique, utilisés pour loger d'une part la population en fonction de l'accessibilité aux lieux d'emploi et d'autre part l'emploi de service en fonction de l'accessibilité aux lieux de résidences et d'emploi. L'hypothèse sous-jacente aux logiques de localisation est la recherche de la proximité.

Le modèle de Lowry est donc un modèle d'accessibilité dans lequel le coût de transport joue un rôle déterminant, dans une approche agrégée, sans spécification micro-économique. A l'instar des modèles gravitaires, Lowry estime que les flux d'une zone à une autre sont proportionnels au nombre d'activités dans chaque zone et inversement proportionnels au coût du transport pour parcourir la distance séparant ces deux zones.

Wilson (Wilson, 1967) critique le déterminisme du modèle de Lowry et emprunte, également à la thermodynamique, la théorie de la maximisation de l'entropie afin d'endogénéiser l'attractivité des zones et leur évolution au cours du temps. L'approche de Wilson apporte des bases théoriques statistiques plus solides aux modèles interactifs.

Anas (Anas, 1983) montre que le modèle logit multinomial résultant de la maximisation de l'utilité aléatoire de la théorie des choix discrets (Domenich, McFadden, 1975) est, à un niveau similaire d'agrégation, formellement équivalent au modèle de maximisation d'entropie proposé par Wilson. Les travaux de Anas apportent donc aux modèles d'interaction spatiale les fondements théoriques économiques qui leur faisaient défaut.

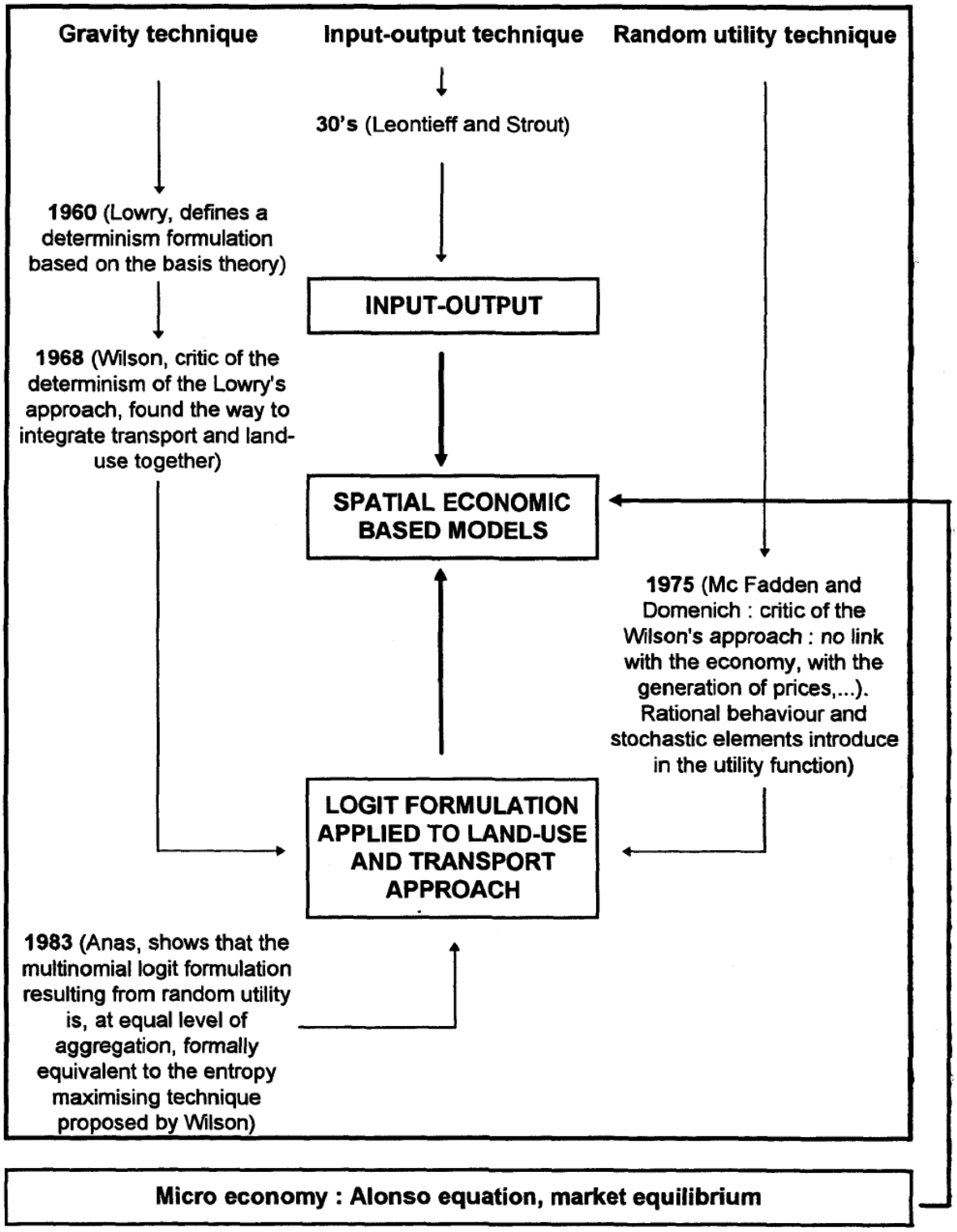
Ben Akiva (Ben Akiva, 1973), de la Barra (de la Barra, 1998), le concepteur de TRANUS, et Galvez (Galvez, 2002), proposent des améliorations du modèle logit multinomial pour corriger les problèmes posés par les hypothèses quant à la distribution des termes stochastiques du choix individuel : l'emboîtement des logit multinomiaux apporte une solution aux problèmes posés par l'indépendance des alternatives non-pertinentes ; l'échelonnage des utilités dans le modèle logit multinomial emboîté résoud les difficultés liées à l'absence de hiérarchie dans le calcul des probabilités de choix.

Comme nous le verrons par la suite, la matrice Entrées/Sorties de Léontieff (Léontieff, 1941), spatialisée, constitue un élément central de certains modèles interactifs, particulièrement de TRANUS.

Enfin, la plupart des LUTM mobilise les fonctions d'enchères du modèle d'Alonso (1964). Chaque acteur urbain offre une enchère pour se localiser aux différents endroits de la ville, en fonction de ses coûts de transport individuels et de son besoin d'espace. Comme les acteurs ont des caractéristiques et des besoins différents, ils donnent des valeurs différentes aux terrains, et il est donc supposé que chaque parcelle est vendue au plus offrant. Ce qui mène à un équilibre de marché où le surplus du consommateur est maximisé.

Les principales techniques mobilisées par les modèles interactifs sont schématisées dans le graphe 48 ; nous présentons plus en détail dans les sections suivantes les théories non encore exposées dans ce chapitre.

Graphe 48 : Théories d'économie spatiale mobilisées dans le développement des modèles interactifs de transport et de localisations.



Source : T. de la Barra, 1996, cours sur TRANUS au CERTU

1) La théorie de la base (Hoyt, 1954) et le modèle gravitaire de Lowry (1964)

Le modèle METROPOLIS de Lowry[115] simule la structure des usages du sol à un moment donné sur la base d'un ensemble limité d'informations : la nature et la localisation des activités industrielles en ville, et la matrice des distances ou des temps de transport entre les zones de la ville. Ce modèle estime d'une part, la taille de la population urbaine totale et sa localisation dans les *m* zones dont la ville se compose, et d'autre part, le volume de l'emploi des services rendus à la population et sa localisation dans les mêmes zones, et enfin, le schéma des déplacements domicile-travail et domicile-commerce (ou encore les déplacements pour l'achat des services) et donc la demande globale de transport en ville.

La logique interne du modèle consiste en une fusion de deux hypothèses théoriques :

1) Lowry emprunte à la théorie de la base économique la dichotomie entre le secteur basique (secteur exportateur, s'adressant à une demande externe) et le secteur non basique (s'adressant à une demande interne, cf. paragraphe suivant). La logique de la base économique urbaine permet d'estimer deux variables liées à la base économique (les emplois basiques) : la population résidente et l'emploi dans le secteur des services.

2) Lowry utilise le principe d'interaction spatiale sous forme de deux modèles de potentiel gravitationnel à contrainte unique, d'une part pour loger la population autour des lieux de travail (modèle résidentiel) et d'autre part, l'emploi de service autour des résidences et des lieux de travail (modèle de localisation des services). L'hypothèse sous-jacente à la logique de localisation dans le modèle consiste à supposer que le choix de l'habitat résidentiel est guidé par les seules considérations d'accessibilité aux lieux de travail - sans même considérer l'élément du coût du sol - et que le choix de localisation des services est guidé - de manière plus acceptable cette fois - par des considérations d'accessibilité de la clientèle potentielle.

La structure logique du modèle peut donc être résumée comme la combinaison du modèle standard de la base économique urbaine à deux modèles d'interaction spatiale qui répartissent l'emploi de service et la population dans toutes les zones de la ville.

a) La théorie de la base (Hoyt, 1954)

Les activités urbaines sont segmentées en activités basiques et activités induites. Ce sont les activités basiques qui sont le moteur de la croissance urbaine.

i) Les principes

Le modèle de la théorie de la base économique (Hoyt, 1954) cherche à expliquer quels sont les principes de croissance des agglomérations. Il s'inscrit dans une perspective macro-économique, définissant la ville avant tout comme un ensemble de relations économiques. Selon Hoyt, la croissance urbaine serait principalement déterminée par des facteurs extérieurs à la ville, en particulier par la demande d'exportation. Le point de départ de cette conception réside dans une analyse dichotomique des fonctions urbaines, qui distingue les fonctions qui s'adressent à la demande externe, et celles, au contraire, qui s'adressent aux besoins locaux de la population. Les fonctions qui s'adressent à une demande externe déterminent les caractéristiques particulières de la ville, sa spécialisation, et son rôle dans la division spatiale du travail. Les fonctions urbaines qui s'adressent à la demande interne sont celles qui permettent à la population urbaine de subsister. Les activités de la base, qui travaillent pour le marché extérieur, deviennent le moteur de la dynamique urbaine. De leur croissance dépendent en effet non seulement l'emploi et le revenu des personnes qui y travaillent, mais aussi, en raison de multiples mécanismes d'interdépendance dans la production et la consommation, l'emploi et le revenu des activités qui leur sont reliées, en amont des activités d'exportation, ainsi que l'emploi et le revenu des activités de service fournies à la population urbaine globale. Ces activités exportatrices sont appelées basiques. Elles dépendent donc de la demande extérieure, et peuvent ainsi varier de manière

[115] Développé pour la ville de Pittsburgh.

autonome, alors que les activités résidentielles qui dépendent des revenus distribués localement ne peuvent que s'adapter passivement.

ii) L'énoncé du modèle de la base économique

Hypothèse 1 : L'emploi total T est composé de :

- L'emploi dans les activités non basiques NB, destinées à la satisfaction de la demande locale,
- L'emploi dans les activités basiques, B, destinées à la satisfaction de la demande extérieure.

$T = NB + B$

Hypothèse 2 : On admet qu'il existe un rapport stable entre NB et B

Et donc entre T et B

$T = m.B$

où m est un coefficient multiplicateur de l'emploi total, appliqué à la variable exogène B qui est l'emploi dans les activités urbaines basiques.

Le passage de l'emploi aux populations exige deux hypothèses supplémentaires.

Hypothèse 3 : On admet la proportionnalité entre activités et emplois. Cette hypothèse revient à supposer une fonction de production à un seul facteur, le facteur travail, et admettre le plein emploi, soit :

$Pa = T$

où Pa est la population active.

Hypothèse 4 : le taux d'activité *a* de la population est supposé stable à court terme :

$Pa = aP$

P est la population totale urbaine.

On peut donc établir :

$P = (m/a)\ B$

Cette formulation permet la prévision démographique d'une ville à partir des prévisions de variation des emplois basiques.

iii) Difficultés et limites

La détermination des activités basiques

Le problème essentiel lié à ce modèle est celui de la détermination des activités basiques. Traditionnellement, seules les activités industrielles (et minières) étaient considérées comme basiques à l'échelle d'une ville ou d'une région. Le deuxième problème, lié au précédent, est que l'on ne dispose pas d'informations quantitatives relatives aux exportations urbaines, qu'elles s'expriment en valeur ou en termes d'emploi dans les productions relatives.

Par exemple, pour l'application de TRANUS-SETU au cas de Bangalore (Inde), nous considèrerons comme activités basiques l'industrie lourde traditionnelle (textile, automobile, …) et moderne (technologie de l'information, biotechnologie) ainsi que les administrations publiques (Bangalore étant la capitale de l'état du Karnataka).

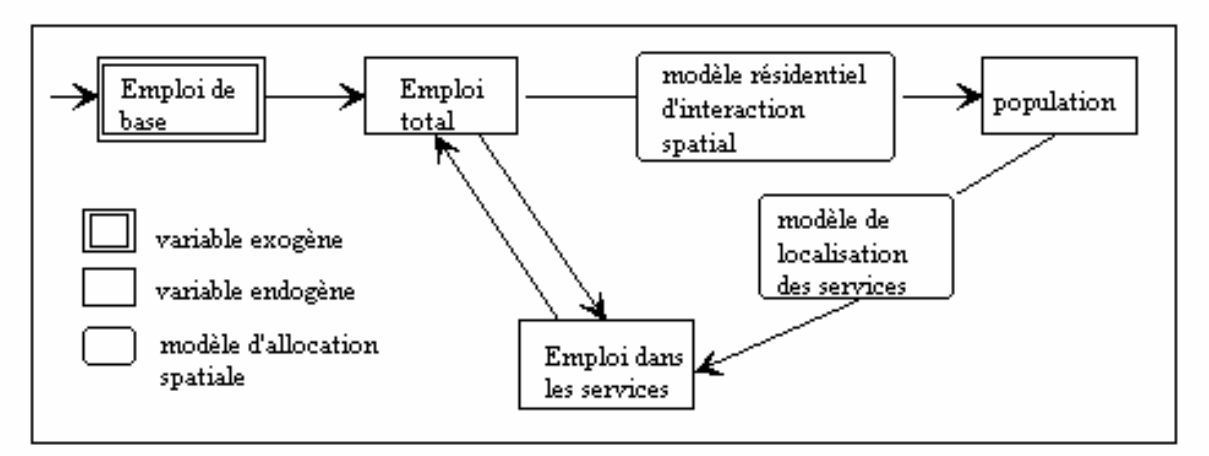
Le caractère statique du modèle

La constance des paramètres, notamment l'invariance du rapport *r* (emploi local / emploi basique) a été mise en doute par de nombreux auteurs, qui ont observé que *r* variait à la fois dans le temps et dans l'espace (Derycke, 1982). A très long terme, la stabilité des multiplicateurs est d'autant plus remise en cause. C'est un fait empiriquement avéré qu'avec la croissance de la dimension urbaine, l'importance relative des activités de service croît également en raison d'un phénomène progressif de substitution des importations (Camagni, 1996). A très long terme, d'autres éléments fondamentaux du modèle changent aussi : la compétitivité des secteurs de spécialisation, la spécialisation même de la ville. Le fait d'utiliser à très long terme le modèle de la base signifie qu'on accepte une stabilité temporelle dans la division spatiale du travail et dans les flux commerciaux territoriaux, dont l'évidence n'apparaît qu'à court terme.

Comme nous le verrons par la suite, le choix de TRANUS nous impose cette contrainte de limiter nos simulations à l'étude du moyen terme. Cette contrainte ne paraît pas rédhibitoire dans la

mesure où notre projet vise à simuler les effets de différentes politiques urbaines sur une période de 15 – 20 ans. Cependant TRANUS présente également l'avantage d'offrir la possibilité de modifier les multiplicateurs à chaque période de simulations.

Graphe 49 : Le modèle de Lowry



b) Structure mathématique du modèle de Lowry (1964)

Le modèle comprend dans sa formulation originelle neufs équations simultanées et trois inéquations de contraintes. (Masson, 2000)

i) L'utilisation du sol

La surface disponible totale dans chaque aire élémentaire *j (j :1 à n)* se décompose de la manière suivante :

$$Sj = Sj^{B} + Sj^{V} + Sj^{S} + Sj^{R}$$

avec

Sj: surface totale de la zone *j*,

Sj^{B} : surface de la zone *j* occupée par les emplois basiques,

Sj^{V} : surface de la zone *j* non urbanisable,

Sj^{S} : surface de la zone *j* occupée par le secteur de détail,

Sj^{R} : surface de la zone *j* occupée par le logement des ménages.

A chaque itération du modèle, le total des aires disponibles pour les usages résidentiels est calculé, en enlevant à la surface globale les zones inutilisables, les zones consacrées aux activités de base (toutes deux données de façon exogène), et les zones attribuées de façon endogène par le modèle aux activités de service.

ii) Détermination de la population et localisation des ménages

Le niveau de la population résidente totale dépend du total des emplois dans l'aire urbaine :

$$P = g.\sum_{j=1}^{n} E_j$$

avec *g*, l'inverse du taux d'activité,

et *E*j, l'emploi total dans la zone *j*.

Ensuite, la population est répartie dans les différentes zones en fonction du nombre total d'emploi et d'une fonction de résistance aux déplacements domicile-travail appliquée aux différentes

localisations des lieux de travail. La distribution de la population se fait donc selon un modèle d'interaction spatiale :

$$P_j = \alpha . \sum_{i=1}^{n} E_i . f_{res}(c_{ij})$$

*P*j, la population de la zone *j*,

α, un facteur d'échelle assurant l'égalité : P = ∑Pj, il est égal à

$$\alpha = \frac{P}{\sum_i \sum_j E_i . f_{res}(c_{ij})}$$

Ainsi la population de chaque zone est une fonction de l'accessibilité de cette zone aux opportunités d'emplois (c'est-à-dire dépend de l'accessibilité à toutes les autres zones en termes d'emploi). En outre, les estimations de *P*j doivent vérifier une contrainte de densité :

$$P_j < Z_j^R . S^R$$

Cette inégalité garantit que les résidents dans une certaine zone ne dépasseront pas une contrainte urbaine de densité résidentielle maximum.

iii) Détermination du niveau d'emploi du secteur de détail et localisation des activités

Le volume d'emploi basique, leur localisation et la surface occupée par ces activités sont donnés de façon exogène. Le volume de l'emploi du secteur de détail de type *k* est défini en termes de coefficient d'activité par personne résidente :

$$E^{Sk} = a_k . P$$

a_k, une constante

k , le type d'activité du secteur de détail.

Cet emploi est localisé dans l'espace urbain autour des localisations résidentielles. Dans son modèle originel, Lowry décompose la répartition de l'emploi de détail sur une zone *j* en deux éléments :

- une part proportionnelle à la population de chaque zone mais pondérée par l'accessibilité plus ou moins aisée à la zone considérée (modèle d'interaction spatiale) ;
- une part induite par l'emploi total local et correspond aux achats courants de la population sur place.

$$E_j^{Sk} = b^k [c^k . \sum_{j=1}^{n} P_i . f_k(c_{ij}) + d^k E_j]$$

c^k et d^k sont des facteurs qui représentent les poids relatifs des achats effectués à partir du domicile et à partir du lieu de travail respectivement. Ils mesurent le potentiel d'attractivité de la zone *j* dans laquelle *P*i est la population résidente des autres quartiers *i*. Avec cette structure, les emplois non basiques sont supposés relativement mobiles et se localisent par rapport aux zones où les résidents se sont localisés. Le principal facteur déterminant les localisations est la mesure de l'accessibilité des résidents à ces emplois. b^k est un facteur d'échelle qui assure l'égalité suivante : E^{Sk}=*somjEj*^{Sk}

Les Ej^{Sk} doivent vérifier les contraintes suivantes :

$$Ej^{Sk} > Z^{Sk}$$

Cette contrainte exprime le fait qu'en deçà d'une certaine taille les activités du secteur de détail ne peuvent pas apparaître (c'est le seuil minimum à partir duquel un commerce peut exister).

La consommation du sol par le secteur de détail peut être calculée ainsi :

$$Sj^S = \sum_k e^k . Ej^{Sk}$$

Une troisième contrainte intervient :

$$Sj^S \leq Sj - Sj^V - Sj^B$$

Cette contrainte exprime les limites de terrain disponible pour le secteur de détail.

iv) L'emploi total

Enfin, l'emploi total peut être déterminé de la façon suivante :

$$E_j = E_j^B + \sum_k E_j^{Sk}$$

Plusieurs itérations sont nécessaires pour arriver à un état d'équilibre qui se caractérise par la stabilité des populations et des activités résidentielles.

Nous pouvons noter la différence qui existe entre la théorie de la base économique urbaine et le modèle de Lowry. En effet, dans le modèle de la théorie de la base, les emplois non basiques sont directement induits par la base économique, tandis que dans le modèle de Lowry, les emplois de détail dépendent de la demande de consommation locale, et donc de la population urbaine. Les établissements de détail sont divisés en *k* groupes, les emplois de chaque type du secteur de détail sont approchés par une fonction du nombre de ménage dans la région. La population est considérée comme une fonction de l'emploi total.

c) Les limites et les perfectionnements du modèle de Lowry

Le modèle de Lowry présente l'avantage de la simplicité et a été de nombreuses fois employé. Cependant, du moins dans sa version originelle, il présente certaines limites qui ont souvent conduit à une reformulation du modèle dans les outils opérationnels.

i) La faiblesse de la spécification des modèles d'interaction spatiale

Les deux modèles d'interaction spatiale utilisés par Lowry sont insuffisamment spécifiés. Le modèle de localisation résidentielle ne satisfait pas à la contrainte de destination c'est-à-dire qu'il ne garantit pas que la somme de ceux qui se déplacent à partir des différentes zones *i* pour travailler en *j* sont égales au nombre de postes de travail existant en *j*. Il ne satisfait en effet qu'une contrainte générale de l'emploi global de la ville. Le modèle de localisation des activités de services est pareillement limité. Wilson (Wilson, 1967) propose de retranscrire ce modèle en appliquant la méthode de maximisation de l'entropie[116]. Il spécifie chacun des modèles de localisation comme des modèles entropiques à contrainte unique. Par ailleurs, Garin (Garin, 1966) a proposé une version matricielle du modèle de Lowry qui présente une plus grande rigueur mathématique.

TRANUS ne présente pas cette limite puisque le modèle d'intéraction transport – urbanisme pour converger doit vérifier une contrainte de prix et de production pour chaque zone et chaque secteur.

ii) La faiblesse des fondements théoriques

Le modèle de Lowry a des fondements théoriques assez faibles du point de vue des mécanismes comportementaux. Ce modèle pêche également par le déterministe étroit qui concourt à la localisation des activités et des ménages, et à la production des déplacements qui en résulte. En outre, l'emprunt de la séparation des emplois à la théorie de la base constitue une faiblesse du modèle. Comme l'a montré Massey (1984), il y a dans celui-ci confusion entre deux définitions du basique : soit le basique

[116] Nous présentons le modèle de maximisation de l'entropie développé par Wilson (Wilson, 1967) dans la section III.B.2.

comprend les activités qui exportent hors de la région urbaine, soit il comprend les activités dont la localisation à l'intérieur du périmètre urbain n'est pas fonction de la localisation de la population de l'agglomération vue comme marché local.

TRANUS apporte sur ce point une flexibilité intéressante puisque, comme nous le verrons dans la section 4 de ce chapitre, il est possible de choisir, voire de croiser ces deux approches du basique.

iii) Le caractère statique du modèle

Le modèle de Lowry correspond à une vision instantanée de la ville : les emplois basiques sont figés, dans leur consistance comme dans leur localisation, de même que les surfaces à leur réserver ou les superficies vacantes ou inutilisables. Le schéma des localisations conjointes des emplois non basiques et des ménages est calqué sur l'information contenue dans la matrice origine-destination des flux de transport à un moment donné. Le modèle est donc entièrement statique. Certes, Lowry fait remarquer que la procédure itérative de résolution du modèle peut s'interpréter comme reconstituant les étapes successives du développement urbain.

Le modèle TOMM (*Time-Oriented Metropolitan Model*) de Crecine (Crecine, 1968) dynamise et complète celui de Lowry grâce aux modifications suivantes :

- L'inertie des structures urbaines passées est prise en compte : une fraction seulement des ménages est autorisée à se délocaliser en fonction de la carte des accessibilités, de même qu'une fraction du sol peut changer d'affectation. En conséquence, le modèle requiert des estimations annuelles et travaille sur des variations différentielles.
- Le modèle est davantage désagrégé spatialement : les zones élémentaires d'étude correspondent à des îlots du recensement. Plusieurs groupes de ménages sont distingués. Les actifs sont séparés en ouvriers et employés.
- Le comportement de localisation des ménages est aussi moins fruste : au lieu de se baser exclusivement sur une logique d'accessibilité, il intègre également, sur chaque îlot, des considérations relatives au zonage, aux contraintes de densité, à la desserte de quartier en écoles et en services publics, enfin à une certaine tendance à l'homogénéisation du quartier par couches sociales. Au total, la localisation des ménages sur chaque îlot dépend désormais d'une dizaine de variables.
- Enfin, les formes fonctionnelles retenues pour implémenter les itérations entre quartiers sont plus diversifiées, et particulièrement non seulement par activité k mais aussi par classes de ménages.

En termes de résultats, « il semble que le modèle TOMM a perdu en précision ce qu'il a gagné en réalisme. Fort consommateur de données statistiques, il n'a jamais pu être calibré avec succès » (Derycke, 1982).

TRANUS s'inscrit dans la famille des modèles issus des travaux de Lowry (Hunt, Echenique, 1993). Les deux modèles sont basés sur la théorie de la base, mais l'usage des matrices Entrées / Sorties par TRANUS lui permet d'apporter une extension pertinente à la théorie de Hoyt (Hoyt, 1954) (Abraham, 1998). De même les deux modèles utilisent des modèles gravitaires pour localiser les emplois induits et les résidences en fonction des difficultés de transport des ménages, mais la localisation spatiale dans TRANUS est basée sur l'utilité aléatoire et permet donc d'intégrer une interprétation plus comportementale des choix de localisation que dans les modèles gravitaires. Les autres différences entre les modèles issus directement des travaux de Lowry et TRANUS sont d'une part la désagrégation plus importante aussi bien dans le sous-modèle des transport que dans celui d'usage des sols et d'autre part la modélisation du marché foncier et de l'élasticité des demandes. Cela permet à TRANUS d'être plus pertinent.

2) La maximisation de l'entropie (Wilson, 1967) et l'utilité aléatoire (Domenich et McFadden, 1975)

a) Macro-analyse des comportements : l'analogie thermodynamique et le concept d'entropie

L'approche des phénomènes d'interaction spatiale basée sur le principe de l'entropie maximale a été proposée par Wilson à la fin des années soixante. Cette proposition permet de poser la spécification de ces modèles en des termes mathématiquement plus cohérents, et de leur donner une base théorique plus solide.

i) Le concept d'entropie : une macro-analyse du comportement spatial

L'entropie est utilisée en thermodynamique pour mesurer le degré du désordre atteint par un système gazeux. En thermodynamique, le principe d'entropie gouverne la dynamique de dégradation de l'énergie dans la physique des processus irréversibles loin de l'équilibre. Il décrit le parcours d'un système soumis à une excitation externe (variation de pression par exemple) qui va de l' " ordre " au " désordre " moléculaire, c'est-à-dire d'une situation de faible probabilité à une situation de forte probabilité. On peut appliquer ce principe à l'analyse des systèmes formés d'un grand nombre d'éléments où il importe moins de connaître l'état de chaque élément particulier que le nombre d'éléments qui se trouvent dans un état particulier donné, sans tenir compte de leur individualité. Le principe d'entropie permet en effet, dans une situation d'information imparfaite, de déterminer l'état tendanciel le plus probable du système qui correspond à sa situation d'équilibre (ou d'entropie maximale).

Wilson (Wilson, 1967) montre que la forme logit de distribution des déplacements correspond à l'arrangement statistique le plus vraisemblable des déplacements étant donné la contrainte sur leur nombre total. Wilson fournit ainsi une interprétation statistique de modèle gravitaire.

Wilson part de la formulation d'un système spatial. Celui-ci est représenté par une matrice nXm de déplacements (ou interactions) tij entre une série de zones d'origine *i* , (i Є I, i=1..n) et de zones de destination j (j Є J, j=1..m). Il s'agit du cadre spatial servant de référence à l'observation générale des flux. Supposons que l'on s'intéresse aux déplacements des résidents de I vers les lieux de J pour un motif donné, le travail. tij sont alors les déplacements domicile-travail de la population N du système, localisée en termes résidentiels en zones d'origine et en termes d'emplois en zones de destination (on suppose pour simplifier que chaque résident est un travailleur). Le tableau de contingence suivant représente une distribution du système à un moment donné.

Tableau 54 : Tableau de contingences représentant une distribution du système spatial à un moment donné

source : Masson, 2000

I \ J	1	j	m	Σ
1 ..				
i		tij		ti.
n				
Σ		t.j		T

tij : nombre de personnes de la zone i effectuant un déplacement en j,
ti. : nombre de résidents de la zone i,
t.j : nombre de personne qui se sont déplacés en j,
T : nombre totale de déplacements.

L'information de base est limitée au macro-état du système, c'est-à-dire au nombre de résidents dans chacune des zones origine Oi et au nombre d'emplois dans chaque zone de destination Dj tandis que le micro-état du système, c'est-à-dire la localisation de l'emploi et de la résidence de chaque individu, est inconnu, mais en réalité peu important. L'inconnue importante est le nombre d'habitants de chaque zone *i* qui se rend tous les jours au travail en zone *j*, ce que l'on peut appeler le méso-état Tij du système. La description du système spatial est quantitative et ne permet pas d'individualiser les unités statistiques qui demeurent interchangeables. Par conséquent, le nombre de fois où l'on peut obtenir cette distribution dépend des permutations pouvant être réalisées à l'intérieur des cases du tableau (Masson, 2000) :

$$W = \frac{T!}{\prod_{i,j} T_{ij}!}$$

avec

$$T = \sum_i \sum_j T_{ij}$$

Ainsi, la distribution la plus fréquente correspond à la plus grande valeur de la fonction W. Au lieu de travailler sur cette expression complexe, Wilson considère son logarithme et introduit l'entropie du système :

$$\ln W = \ln T! - \sum_i \sum_j \ln T_{ij}!$$

Wilson suppose que les effectifs Tij sont très importants de façon à pouvoir utiliser l'approximation de Stirling, c'est-à-dire *logX! = XlogX-X*.

$$\ln W = (T \ln T - T) - \sum_i \sum_j (T_{ij} \ln T_{ij} - T_{ij})$$

Etant donné que

$$T = \sum_i \sum_j T_{ij}$$

$$\ln W = T \ln T - T - \sum_i \sum_j T_{ij} \ln T_{ij} + T$$

$$\ln W = -T \sum_i \sum_j \frac{T_{ij}}{T} \ln \frac{T_{ij}}{T}$$

Cette dernière expression définit l'entropie du système I*J. L'entropie moyenne, notée H, est obtenue en divisant lnW par T, soit :

$$H = -\sum_i \sum_j P_{ij} \ln P_{ij}$$

où $P_{ij} = \frac{t_{ij}}{T}$ représente la probabilité qu'une personne effectue un déplacement de i vers j.

Comme le souligne Fustier (Fustier, 1988), « il faut se garder cependant d'interpréter ces probabilités comme une tentative de formalisation des comportements individuels ». Wilson ne

s'intéresse pas à l'individu, sauf en tant qu'élément d'une foule dont il cherche à préciser la configuration. C'est le comportement global qui passe au premier plan de l'analyse.

ii) Maximisation de l'entropie sous contraintes

La distribution qui a le plus de chance d'être observée en pratique n'est pas donnée par une diffusion uniforme des flux à l'intérieur du système car le degré de désordre de cette distribution est limité par l'introduction de contraintes dans le processus de maximisation de l'entropie. Wilson propose de formaliser trois contraintes (Masson, 2000) :

- la contrainte d'origine ∑j(Tij)= Oi, qui signifie que le nombre total de personnes qui se déplacent à partir d'une zone donnée ne doit pas excéder le nombre de ses résidents.
- la contrainte en destination ∑i(Tij) = Dj, qui signifie que le nombre total de personnes se déplaçant dans une zone donnée ne peut excéder le nombre d'emploi de cette zone.
- la contrainte de coût ∑i ∑j (cijTij) = C, pour laquelle l'ensemble des déplacements doit être réalisé à l'intérieur d'une enveloppe budgétaire globalement donnée.

La solution analytique au problème, à savoir la valeur des Tij, s'obtient en maximisant la fonction d'entropie sous les trois contraintes qui fournissent l'information sur le macro-état du système. On construit le Lagrangien L :

$$L = -\sum_i \sum_j (T_{ij} \ln T_{ij} - T_{ij}) + \sum_i \lambda_i (O_i - \sum_j T_{ij}) + \sum_j \mu_j (D_j - \sum_i T_{ij}) + \beta(\overline{C} - \sum_i \sum_j c_{ij} T_{ij})$$

Après calculs, on obtient la spécification du modèle gravitaire :

$$Tij = ai\ bj\ Oi\ Dj\ e^{-\beta cij}$$

Fustier (Fustier, 1988) remarque que ai et bj s'apparentent, en quelque sorte, à des poids moléculaires associés aux masses Oi et Dj.

iii) Intérêt et limite de l'analyse

Les résultats de l'approche thermodynamique de l'interaction spatiale suggèrent les réflexions suivantes :

La spécification proposée correspond d'une manière générale à la spécification gravitationnelle, avec O, D, c qui remplacent les masses et la distance physique. On démontre que la formulation exponentielle de la fonction de friction spatiale procède de l'hypothèse qui veut que celui qui se déplace perçoive linéairement le coût du déplacement ; si l'on suppose qu'il perçoit ce coût de façon décroissante avec la distance déjà parcourue (par exemple une fonction logarithmique de la distance), on obtient la fonction puissance propre au modèle gravitationnel. Ainsi, la fonction de résistance aux déplacements est reliée au coût de transport global par l'intermédiaire du paramètre b dont le rôle est analogue à celui de l'exposant de la distance dans les modèles traditionnels. Mais, à la différence des modèles dérivés empiriquement, la valeur du taux d'atténuation trouve ici une justification théorique : un b élevé signifie que la contrainte économique imposée aux déplacements est sévère (C faible) et inversement. En outre, la fonction exponentielle possède l'avantage de faire correspondre une valeur finie à nik lorsque cik=0.

Le modèle présente une série de constantes Ai et Bj au nombre n+m au lieu de la seule constante k du modèle gravitationnel. Cela provient du fait que l'on veut respecter pour l'ensemble du système les n+m contraintes données par la population dans les zones d'origine et de destination, et non seulement la contrainte fournie par la population totale.

b) Micro-analyse du comportement spatial individuel : la théorie de l'utilité aléatoire (McFadden, 1973)

Après avoir présenté une macro-analyse du comportement spatial, nous nous intéressons à présent à une analyse du comportement spatial menée au niveau individuel.

On peut en effet déduire la relation gravitationnelle d'interaction spatiale selon une approche différente procédant d'une extension de la théorie du choix du consommateur à la décision de déplacement. Tout déplacement est source d'utilité pour celui qui l'entreprend. Cette idée a permis à certains auteurs de transposer les apports de la théorie des choix individuels de consommation à l'analyse du comportement spatial et de considérer le voyageur comme un consommateur de déplacements. Ainsi, sous des contraintes budgétaires, le consommateur essaiera de maximiser sa fonction d'utilité des déplacements. Dans ce cadre, plusieurs approches ont été proposées selon la définition de l'utilité, conduisant à une reformulation et une justification des modèles gravitaires fondées sur l'analyse des comportements individuels.

La théorie des choix probabilistes ou théorie de l'utilité aléatoire a été introduite par McFadden (McFadden, 1973). Elle fournit une approche plus flexible que celle de la micro-économie urbaine standard au problème de la représentation des choix. Wegener (Wegener, 1994) constate que la plupart des modèles interactifs les plus récents intègrent la théorie des choix discrets pour expliquer et prévoir les comportements des acteurs urbains tels que les investisseurs, les ménages, les firmes, les voyageurs. Certains modèles proposent une approche hybride entre la théorie de l'utilité aléatoire et les processus d'enchères à la Alonso (cf. les travaux de Martinez sur l'accessibilité présenté dans la section suivante, 1995).

Nous avons déjà exposé l'application de la théorie de l'utilité aléatoire aux choix de déplacement lors de la présentation des modèles de choix discrets. Nous avions vu alors que cette approche repose, pour la partie économique, sur des hypothèses de comportement rationnel de l'individu, pour la partie mathématique sur le logit multinomial, modèle construit sur des hypothèses quant à la distribution des termes stochastiques du choix individuel.

Nous allons ici analyser les problèmes posés par les hypothèses du logit multinomial.

i) Le modèle logit multinomial (MNL)

Le modèle logit multinomial s'appuie sur les hypothèses suivantes :

- L'individu est rationnel, il a une fonction d'utilité précise, même si elle n'est pas extérieurement définissable, et il choisit l'alternative qui lui fournit la plus grande utilité.
- L'utilité est à deux composantes : une composante déterministe, calculable sur la base des caractéristiques du décideur et du choix considéré, et une composante aléatoire, comprenant les éléments de subjectivité de chaque décideur et les erreurs d'évaluation.

Pour le décideur h de la classe i, l'utilité de l'alternative r est :

$Uhr = Vir + \varepsilon hr$

- Les éléments aléatoires ont, pour tous les décideurs et toutes les alternatives, une distribution commune de probabilité (dite de Gumbell type I) et sont indépendants (independently and indentically Gumbel-Distributed IID). Il s'agit d'une hypothèse très restrictive introduite pour obtenir une formalisation analytique simple du modèle et relativement facile à estimer empiriquement.

La probabilité qu'un décideur caractéristique de la classe i choisisse l'alternative r est alors donnée par une expression dite logit multinomial :

$$\Pr_i = \frac{e^{-\lambda U_i}}{\sum_j e^{-\lambda U_j}} \quad \forall i,j \in N$$

Avec λ le paramètre de dispersion.

ii) Logit multinomial emboîté (NMNL)

L'analyse des comportements dans un système urbain se confronte à l'étude de chaînes de décisions du type :

Localisation de l'emploi → localisation résidentielle → shopping → mode de transport

Où chaque lien le long de la chaîne est conditionné par les liens précédents mais de plus les influence en retour : le lieu du shopping peut être décidé en fonction d'une bonne desserte en bus.

Aussi le calcul doit procéder à rebours. Dans notre exemple, il s'agit de considérer la totalité des possibilités de transport depuis la résidence jusqu'aux lieux de commerce. Pour cela, il faut

calculer les coûts composites correspondants et définir l'ensemble des utilités agrégées de toutes les possibilités de shopping autour de la résidence. Ainsi l'élément transport est introduit dans l'utilité du shopping, et éventuellement dans l'utilité de la résidence. Une fois la chaîne de décision remontée, on peut repartir dans l'autre sens et calculer les probabilités de chaque décision. Cette méthode est connue sous le nom de modèle logit multinomial emboîté (nested multinomial logit model (NMNL)).

Cette méthode présente deux avantages simultanés :

- Elle permet de se rapprocher des modalités réelles de choix citées ci-dessus
- Cette hiérarchisation est une solution au problème lié au logit multinomial (MNL) : « l'indépendance des alternatives non-pertinentes », sans tomber dans la complexité analytique de modèles probit proposés à partir des travaux de Galvez (Galvez, 2002)

En effet, la formulation en logit multinomial donne naissance à une propriété inacceptable, dite « d'indépendance des alternatives non-pertinentes » : si une alternative nouvelle s'ajoute aux possibilités de choix, elle réduit proportionnellement la probabilité de chacun des autres choix, sans modifier le rapport entre les probabilités des choix préexistants. Cette propriété peut conduire à des résultats erronés si certaines alternatives sont fortement corrélées. Un exemple classique est donné par Debreu (Debreu, 1960) : supposons qu'un individu soit indifférent envers le choix d'un bus bleu ou d'un bus rouge pour effectuer un trajet, si uniquement cette alternative est proposée. Si on ajoute un taxi dans l'ensemble des choix alors il préfèrera cette solution contre chacune des deux autres dans un rapport de 1 à 4. On a donc P(BB / {BB, BR}) = 0,5 ; P(T / {T, BR}) = 0,8 et P(T / {T, BB}) = 0,8 et P(T {T, BB, BR}) = 0,67. La probabilité du choix du taxi est diminuée alors que rien ne le justifie. Ce qui veut dire par exemple que la construction d'un nouveau supermarché dans une aire donnée prendra des clients à tous les autres points de vente préexistants, et non pas seulement aux plus proches ; la naissance d'un nouveau parti de gauche drainera des voix de tous les vieux partis et pas seulement des partis de gauche.

Le modèle logit multinomial emboîté regroupe les alternatives fortement corrélées dans une première option pour un premier niveau de calcul, puis les traite comme des options séparées lors d'un deuxième, optionnel, niveau de calcul.

Pour prendre en compte les élasticités et les coûts variables, la méthode de calcul est itérative : elle agrége les utilités et estime les probabilités précédentes et suivantes plusieurs fois jusqu'à ce qu'un état d'équilibre soit atteint.

iii) Logit multinomial emboîté à échelle (SNMNL)

Au fur et à mesure des applications de TRANUS, de la Barra (de la Barra, 1998 ; 2000) identifie deux problèmes dans le modèle logit multinomial emboîté.

Le premier problème est le manque d'échelle dans le calcul des probabilités de choix. Il est en effet très difficile de calibrer le modèle logit multinomial emboîté lorsqu'il s'agit de gérer des décisions simultanément à différentes échelles. Cela est dû au fait que le modèle logit ne prend en compte que les différences absolues entre les utilités des options alternatives. C'est-à-dire qu'une différence de 5 Euros dans un vol entre Paris et Bangalore est perçue comme une différence de 5 Euros dans un déplacement de La Défense au jardin du Luxembourg. En effet, dans le modèle logit, la perception de l'utilité est supposée constante et indépendante de l'utilité totale de chaque option.

Pour résoudre cette inconsistance, de la Barra suppose que l'utilité marginale perçue est décroissante lorsque l'utilité augmente. Il y a plusieurs façons de représenter la décroissance de la perception de l'utilité. Par simplicité, de la Barra adopte une décroissance linéaire de la perception marginale de l'utilité. L'utilité Ui est remplacée par l'expression (Ui/U*) où U* est l'utilité de la meilleure option. Cette hypothèse le conduit à une famille de logit multinomial emboîté dans laquelle les utilités sont échelonnées.

Le second problème est la convergence vers moins l'infini de la fonction de coût composite lorsque l'indice de dispersion λ tend vers zéro. En effet, si la probabilité qu'un décideur caractéristique de la classe i choisisse l'alternative r est donnée par l'expression :

$$\Pr_i = \frac{e^{-\lambda U_i}}{\sum_j e^{-\lambda U_j}} \quad \forall i,j \in N$$

Alors la seule fonction de coût composite associée consistante est de la forme (Williams, 1977) :

$$S = -\frac{1}{\lambda} \ln\left[\sum_j e^{-\lambda U_j}\right]$$

Où S est le coût composite, équivalent au surplus du consommateur (Williams, 1977).

Le problème, décrit par Williams (Williams, 1977), est qu'alors la fonction de coût tend vers moins l'infini lorsque λ tend vers zéro. Ce qui est incompatible avec l'interprétation du coût composite comme un coût réel, puisque les coûts ne peuvent être négatifs (Fosk, Boyce, 1984). Mais cela est aussi incompatible avec le modèle d'utilités échelonnées, particulièrement si une option devient négative et les autres restent positives. En fait, si λ tend vers zéro, les décideurs sont indifférents à la fonction d'utilité, donc leur bénéfice devrait tendre vers zéro, et non moins l'infini. De la Barra propose alors une forme en série pour la fonction de coût composite :

$$S = \sum_{j=1}^{z} e^{-\lambda U_j} \prod_{h=1}^{j-1} \left(1 - e^{-\lambda U_h}\right)$$

Cette série converge alors vers zéro et non moins l'infini et est consistante avec la théorie des choix économiques. De même, le surplus du consommateur converge vers zéro lorsque λ converge vers zéro.

Une autre solution, plus solide théoriquement, a été proposée par Galvez (Galvez, 2002) : les éléments aléatoires sont supposés adopter une distribution identique et indépendante de probabilité (IID) dite de Gumbell II (et non de Gumbell type I comme dans le modèle logit). Cette approche conduit à une fonction puissance dans laquelle la probabilité de choisir une option et le coût composite correspondant sont donnés par :

$$P_i = \frac{U_i^{-\beta}}{\sum_j U_j^{-\beta}} \quad \forall i,j \in N \qquad\qquad S = \left(\sum_i U_i^{-\beta}\right)^{-\frac{1}{\beta}}$$

Du fait de la fonction puissance, ce modèle est appelé powit, au lieu de logit.

c) La relation entre les modèles d'interaction spatiale et les modèles de choix discrets

Les fortes similitudes entre les modèles d'interaction spatiale fondés sur la maximisation de l'entropie et ceux établis sur le principe de la maximisation de l'utilité ont été soulignées très tôt. Cependant, malgré la recherche d'une approche synthétique, ces deux analyses sont restées disjointes, ceci étant principalement lié à l'utilisation de données de nature différente. Les modèles d'interaction spatiale entropique nécessitent des données agrégées, tandis que les modèles comportementaux de la demande requièrent des données désagrégées.

Anas (Anas, 1983) démontre qu'à un même niveau d'agrégation, ces deux approches pouvaient être considérées comme strictement identiques. Pour lui, les modèles comportementaux de demande qui découlent des travaux de McFadden (McFadden, 1973) et les modèles de maximisation de l'entropie, qui découlent des travaux de Wilson (Wilson, 1970), peuvent être considérés comme équivalents.

Anas est parvenu à plusieurs résultats :

- le modèle logit multinomial, qui résulte originellement de l'approche probabiliste de maximisation de l'utilité aléatoire, peut être dérivé également à partir de l'approche de maximisation de l'entropie.
- la méthode de maximisation de vraisemblance et celle de maximisation de l'entropie conduisent à des estimations identiques des coefficients du modèle logit multinomial.
- le modèle gravitaire à double contrainte peut être considéré comme un modèle de comportement pour le choix d'une paire d'origine-destination.

L'équivalence entre ces deux approches est un élément théorique fondamental, dans la mesure où il fournit aux modèles d'interaction spatiale, en général, et aux modèles d'entropie en particulier, la base micro-économique et comportementale qu'ils n'avaient pas.

Le principe d'interaction spatiale, considéré également par Camagni (Camagni, 1996) comme la demande de mobilité et de contacts, donne une mesure du lien transport-urbanisation sans toutefois présumer d'une relation de causalité. Un concept relativement proche est celui de l'accessibilité. Le principe d'accessibilité est à la base de l'organisation interne de l'espace urbain, et procède de la compétition des différentes activités économiques entre elles pour s'assurer les localisations les plus avantageuses (Camagni, 1996).

3) La notion d'accessibilité

a) Définitions (Hansen, 1959)

C'est en 1959 que Hansen proposait les premières définitions et utilisations du concept d'accessibilité. L'accessibilité est une notion plus riche que celle de proximité (dans son acception courante). Initialement, le terme de proximité exprimait deux notions différentes : une distance faible et un accès à une autre unité ou fonction économique. Si les deux notions étaient fondues dans le même mot, c'est parce qu'une distance kilométrique importante était perçue comme ce qui empêche « l'accès à » et inversement une distance réduite comme ce qui donne « l'accès à » (Molin, Vulin, 1992). Certaines évolutions sont venues troubler progressivement cette perception de la proximité : une hiérarchisation des performances de vitesse de plus en plus poussée entre les différents modes de transport entraîne tout d'abord que « l'accès à » peut être identique en se situant à deux distances différentes, mais en utilisant des modes de transport eux aussi différents. Dans la mesure où les différents réseaux de transport ont des couvertures spatiales qui sont imparfaites et qui introduisent *de facto* une différenciation spatiale, à égalité de distance, « l'accès à » peut être très différent. Enfin, le phénomène de congestion, notamment urbaine, a pour corollaire qu'une distance géographique faible ne donne pas systématiquement « l'accès à ». Dès lors, le terme de proximité devient trop vague pour exprimer les deux idées de plus en plus disjointes de « distance faible » et « d'accès à » : coût et durée du déplacement sont de moins en moins proportionnels à la distance parcourue. Cela introduit la nécessité de la mesure de « l'accès à » : la notion d'accessibilité.

De façon générale, l'accessibilité est la mesure des efforts nécessaires pour franchir les barrières opposées notamment par l'espace au mouvement des personnes et des choses, comme à l'échange des biens, des services et des informations (friction spatiale). C'est une mesure de la facilité avec laquelle des activités peuvent être atteintes à partir d'une localisation donnée. Les mesures d'accessibilité sont fondées sur le principe que l'espace contraint le nombre d'opportunités accessibles.

b) Des mesures de l'accessibilité

L'accessibilité fait l'objet de plusieurs propositions de définition et de mesures. Il existe des variations considérables sur les éléments que l'indicateur doit inclure, et sur la manière dont ils sont mesurés et combinés. Le choix d'une mesure d'accessibilité dépend du type d'application envisagé.

Dans un premier temps, il convient de distinguer les indicateurs d'accessibilité relative de ceux d'accessibilité totale. L'accessibilité relative représente la relation ou le degré de connexion entre deux points, tandis que l'accessibilité totale décrit la relation ou le degré d'interconnexion entre un point donné et tous les autres à l'intérieur d'un ensemble de points dans l'espace. La première est une mesure de l'effort nécessaire pour effectuer un déplacement, tandis que la seconde est une sorte de mesure des opportunités totales de déplacements à partir et en provenance d'un point sous contrainte du système de transport.

Deux approches sont communément utilisées afin de mesurer l'accessibilité : d'une part les mesures de type gravitaire développées ci-après, et d'autre part, les mesures isochroniques indiquant le nombre d'opportunités qui peuvent être atteintes en un temps ou une distance donnés. Les mesures gravitaires sont souvent préférées car contrairement aux mesures isochroniques, elles considèrent toutes les possibilités finales des déplacements et évitent ainsi l'introduction d'une frontière spatiale subjective et parfois arbitraire.

Puisque la plupart des déplacements sont des moyens pour atteindre un objectif, effectuer une activité, une mesure de l'accessibilité qui reflète la distribution des activités à l'intérieur de la ville semble plus pertinente qu'une mesure qui décrit simplement la facilité de traverser un espace par un système de transport donné, c'est-à-dire un indicateur de temps ou coût de transport.

La mesure de l'accessibilité la plus employée découle de celle proposée par Hansen (Hansen, 1959).

$$A_{ik} = \sum_j O_{jk} f(c_{ij})$$

où

A_{ik} est l'accessibilité de la zone i aux opportunités de types k dans les zones $j = 1,...,n$;

O_{jk} est une mesure des opportunités de type k offertes dans la zone j ;

c_{ij} est une mesure de la séparation spatiale entre i et j ;

$f(c_{ij})$ est la fonction de résistance aux déplacements.

A partir de cette formule de base peut se décliner un ensemble de mesures. Premièrement, il existe autant de mesures d'accessibilité que de types d'opportunités : emplois totaux, emplois de commerce, emplois tertiaires, activités de loisirs, etc. Deuxièmement, la mesure de la séparation spatiale peut être exprimée de différentes façons : en termes de distance, de temps réel ou perçu, de coût, et enfin de coût généralisé. Quand la séparation spatiale est mesurée en temps ou coût de transport, cela implique de considérer les modes de transports utilisés. La mesure de l'accessibilité peut aussi bien considérer un temps ou coût multimodal, indicateur de la performance globale du système de transport urbain, mais également prendre en considération le temps ou coût en automobile, ou en transport collectif, ou encore à pied, etc. Enfin, la fonction de résistance aux déplacements peut être spécifiée de différentes manières.

Le problème capital est de passer de cette notion intuitive, de cette « facilité ressentie » dépendante de l'individu et de ses paramètres propres, à une formulation opérationnelle. Pour aboutir à cette formulation, deux démarches différentes sont possibles : la première reste basée sur une interprétation intuitive et amène à proposer diverses fonctions empiriques : la deuxième se fonde au contraire sur les hypothèses classiques de comportement rationnel de la micro-économie. Concernant la démarche empirique, la fonction de pondération des opportunités est nécessairement décroissante. En effet, plus une opportunité est proche, plus elle est considérée comme accessible. A distance nulle, l'accessibilité est maximum, à distance infinie, elle est nulle. Les fonctions les plus couramment utilisées sont du type exponentielle négative, ou hyperbolique. Mais ces fonctions ont l'inconvénient de pondérer très fortement les distances faibles, de décroître très rapidement et de pondérer de manière très faible et uniforme les distances élevées. Au contraire, la fonction puissance, qui peut être également employée, conduit à pondérer plus fortement les distances élevées. Certains auteurs ont proposé l'utilisation de courbes de pondération normales (ou du moins la moitié droite d'une courbe normale) qui ont l'avantage de présenter une sorte de « plateau » pour les distances faibles, correspondant aux secteurs considérés comme parfaitement accessibles ; puis une partie où la décroissance est rapide, et où les opportunités sont moyennement, ou relativement accessibles ; et

enfin une dernière partie tendant asymptotiquement vers zéro, où l'accessibilité devient très faible, voire nulle.

La spécification standard proposée par Hansen a été remise en cause par certains auteurs, notamment par Ben-Akiva et Lerman (Ben-Akiva, Lerman, 1979), parce qu'elle évacue toute considération des personnes intéressées par cette accessibilité, c'est-à-dire les bénéficiaires de l'accessibilité. Avec cette formulation, on considère implicitement que tous les individus de la zone *i* bénéficient du même niveau d'accessibilité, en niant le fait que les individus peuvent percevoir cet avantage de manière différente selon leurs caractéristiques socio-économiques, le motif du déplacement, etc. En effet, la perception de l'accessibilité varie selon les individus, et une agrégation zonale fournit une base inadéquate pour reproduire des variations entre des circonstances individuelles. En définitive, il n'existe pas un indicateur mais des indicateurs d'accessibilité.

Comme nous le verrons dans la section 4, le choix de TRANUS nous permettra de différencier et conserver différentes mesures de l'accessibilité : de façon agrégée, accessibilité totale ou selon le type d'opportunité motivant le déplacement et les modes de transports, accessibilité relative. L'accessibilité est mesurée par la désutilité du transport et par le coût généralisé du transport. Elle affecte aussi bien les décisions de localisation que les choix de transport. La mesure de la séparation spatiale est donc exprimée en terme de désutilité et de coût monétaire (un élément de la désutilité) pour les passagers.

c) Théories économiques et accessibilité

Certains auteurs ont cherché à dépasser la notion d'accessibilité comme mesure physique, empirique, et ont tenté d'apporter des fondements théoriques aux comportements de déplacement des agents économiques, afin, entre autres, de justifier la spécification de telle ou telle fonction de pondération des opportunités. En outre, ces mêmes auteurs ont cherché à théoriser la relation intuitive existant entre un changement perceptible de l'accessibilité physique et les modifications des comportements de déplacements. Différentes approches théoriques, fondées sur des modèles de comportements micro-économiques des consommateurs, ont été spécifiées afin d'exprimer la relation causale de façon mathématique. Koenig (Koenig, 1974) propose une théorie économique de l'accessibilité qui cherche à évaluer l'utilité procurée par la possibilité d'accéder aux différents points d'intérêt de la ville par l'intermédiaire du réseau de transport. Ben-Akiva et Lerman (Ben-Akiva, Lerman, 1979) proposent une mesure de l'accessibilité basée sur les modèles de l'utilité aléatoire.

i) L'apport de la théorie micro-économique au concept d'accessibilité (Koenig, 1974)

Koenig (Koenig, 1974) part du constat que la mesure de l'utilité de l'usager d'un système de transport ne saurait être réduite à une mesure de la séparation spatiale, même exprimée en termes de coûts généralisés. L'auteur souligne ainsi l'insuffisance de la notion de coût généralisé de déplacement couramment utilisée pour caractériser le point de vue de l'usager. Cette notion n'intègre en effet que les seuls facteurs négatifs (coûts monétaires, temps perdus pondérés par les coefficients d'inconfort). Ne prenant en compte qu'un aspect limité du déplacement, la notion de coût généralisé de déplacement ne peut réellement traduire la satisfaction (ou l'insatisfaction) ressentie par l'usager. Car si se déplacer est ressenti par l'usager comme une contrainte, atteindre sa destination est, en revanche, ressenti par lui comme une satisfaction[117].

[117] Koenig illustre ce phénomène en donnant un exemple. Des études ont mis en évidence les effets de travaux entrepris dans une agglomération pour améliorer la qualité du réseau de transport. L'objectif déclaré étant de réduire les durées et les coûts de transport. Or, ce que l'on a constaté, c'est qu'à la mise en service de ces ouvrages, les temps de transport ne variaient presque pas, mais que les longueurs de déplacements, elles, augmentaient. Ce constat s'explique par le fait que l'usager met à profit toute amélioration d'infrastructure à l'augmentation préférentiellement de la longueur moyenne de ses déplacements plutôt que la réduction de ses temps et ses coûts de transport. Cela traduit le fait que l'usager préfère développer l'univers de ses choix dès que les infrastructures de transport le lui

La théorie de l'accessibilité urbaine de Koenig cherche à mesurer l'utilité nette d'un déplacement pour un agent économique, la satisfaction retirée d'un déplacement, qui est en fait la différence entre les deux éléments composant le déplacement : un élément moteur, représenté par l'intérêt attaché par le citadin à la possibilité d'accéder à un lieu de destination donné, et un élément résistant, représenté par le temps, l'argent, l'inconfort qu'il faut « payer » pour se déplacer.

Avant de présenter la théorie économique de l'accessibilité de Koenig, nous allons exposer l'approche intuitive de la mesure de la satisfaction de l'usager de transport donnée par Poulit (Poulit, 1974). Poulit étudie les conditions à remplir si on fait varier à la fois sur une liaison *i* et *j* donnée, les conditions d'urbanisation en *j* (les emplois offerts) et les conditions de transport entre *i* et *j*, pour que la satisfaction de l'usager reste constante. Il parvient à la conclusion que pour atteindre ce résultat, il suffit qu'à toute progression arithmétique du coût de transport soit associée une progression géométrique des choix offerts à la destination. Il propose alors de considérer le logarithme des biens offerts pour exprimer la satisfaction de l'usager. Log Ej caractérise (à un facteur près l) l'intérêt que l'usager attribue à la possibilité de pouvoir disposer à sa destination d'un marché d'emplois, de services ou de biens égal à Ej. En retirant de ce terme positif le facteur négatif, c'est-à-dire le coût généralisé de transport (cij), il définit la satisfaction ressentie par l'usager qui s'écrit, pour une liaison ij donnée (Masson, 2000) :

$$S_{ij} = \lambda \log(E_j e^{-\beta c_{ij}})$$

Cette expression peut être étendue à l'ensemble des liaisons issues de i. Ainsi les résidents de la zone i prennent-ils en compte l'ensemble des destinations potentielles qui leur sont offertes avant d'effectuer leurs déplacements. La satisfaction d'un résident de la zone i vis-à-vis de l'ensemble des biens offerts par l'ensemble des zones j est égale à :

$$S_i = \lambda \log(\sum_{j=1}^{n} E_j e^{-\beta c_{ij}})$$

Koenig (Koenig, 1974) reprend cette approche en lui donnant une dimension théorique qui s'inscrit dans la tradition néoclassique du comportement du consommateur. Il propose d'intégrer le concept d'accessibilité dans la mesure de l'utilité de l'usager, et définit la notion d'utilité nette. Koenig formalise sa théorie économique de l'accessibilité urbaine à partir de l'exemple de Monsieur Dupont résidant dans la zone *i* d'une agglomération et à la recherche d'un emploi. On suppose que M. Dupont se comporte comme suit :

Il associe à chacune des possibilités d'emploi qui lui sont offertes un revenu annuel, *R*. Ce dernier tient compte du revenu réel offert, des chances effectives qu'il a d'être retenu sur cet emploi et, également d'un certain nombre de variables subjectives (convenances personnelles, intérêt qu'il porte à ce travail, avantages sociaux procurés, etc.) ;

De même, à chacun des lieux où une possibilité d'emploi est offerte, M. Dupont associe un coût généralisé annuel du transport, *T* (temps passé, coût monétaire, inconfort, risque d'accident, *etc*.) tenant compte des spécificités inhérentes à sa propre situation (possession d'une voiture, niveau de congestion du réseau, qualité des transports en commun, etc.) ;

Pour chacune des offres d'emploi dont il peut avoir connaissance, M. Dupont évalue l'utilité nette, $U=R-T$;

Enfin, il retient l'emploi qui lui procure la plus grande utilité nette. Concrètement, c'est l'utilité nette moyenne des résidents de la zone *i* ayant des caractéristiques socio-économiques voisines de celles de M. Dupont à laquelle on s'intéresse. Il suffit donc de connaître la distribution des revenus équivalents estimés par un de ces résidents aux emplois offerts.

Il suppose ensuite que le revenu équivalent *R* associé par un individu précis (M. Dupont) à un emploi tiré au hasard suit une variable aléatoire. Intuitivement, il est clair que beaucoup d'emplois n'offrent qu'un revenu équivalent faible ; la loi de probabilité est supposée être exponentielle négative, ce qui signifie que la probabilité de trouver un salaire (ou utilité nette) supérieur à une valeur donnée

---

permettent plutôt que de réduire ses temps de déplacements. Cette observation est à rapporter à l'hypothèse formulée par Zahavi (1980).

décroît très rapidement quand cette valeur augmente. La densité de probabilité, *f(x)*, de la variable aléatoire *R* est alors de la forme suivante :

$$f(x) = \frac{1}{x_o} e^{-x/x_o}$$

*x*o est le coefficient caractéristique de l'individu choisi (M. Dupont).

On montre que l'utilité nette offerte à l'individu caractéristique est une variable aléatoire dont la moyenne est :

Ui = x0.log (Ai)

Avec

$$A_i = \sum_j E_j e^{-C_{ij}/x_o}$$

i est la zone de résidence de l'individu, n est le nombre de zones du périmètre étudié, Ej est le nombre d'emplois de la zone j, Cij est le coût généralisé annuel du transport de la zone i vers la zone j, soit du trajet aller-retour pour se rendre à un travail en j quand on habite en i.

On montre que 1/xo est le coefficient de conductance des modèles gravitaires et que Ai est un indicateur d'accessibilité aux emplois. Il caractérise la liberté de choix offerte au citadin considéré. Il représente le nombre des destinations possibles compte tenu d'un coefficient d'atténuation e^(-Cij/x0) fonction du coût de transport : une destination très proche (cij nul) compte pour 1, une destination très éloignée (cij infini) pour zéro. Ai peut s'interpréter comme " le nombre d'emplois équivalents ramenés à une distance nulle " offert à M. Dupont. Cette formule, qui au final donne l'utilité finalement offerte par la ville et ses transports au citadin considéré, constitue le résultat fondamental de la théorie de l'accessibilité. Si M. Dupont n'avait qu'un seul emploi à sa disposition ou s'il était contraint d'en prendre un que le « planificateur suprême » lui aurait désigné au hasard entre plusieurs milliers d'emplois possibles, son revenu moyen serait égal à xo. En fait, il multiplie ce revenu de base par logAi puisqu'il peut choisir dans toute l'agglomération celui qui lui permet d'améliorer le plus fortement son utilité nette par rapport à xo. Le revenu de base, xo, est nettement plus faible que le revenu moyen (salaire moyen) ; il est en effet la moyenne entre une petite minorité d'emplois qui conviennent effectivement à M. Dupont (comptés alors pour le salaire qui leur est attaché) et une forte majorité d'emplois qui ne lui conviennent pas (comptés alors pratiquement pour zéro, quelque soit leur revenu correspondant). Ce qu'il faut retenir c'est que plus la liberté de choix de M. Dupont augmente, plus il a des chances de trouver un emploi bien rémunéré, intéressant (qui lui convient) et proche de son domicile (qui minimise les coûts liés au déplacement).

La théorie de l'accessibilité permet donc d'expliciter et de justifier mathématiquement l'idée de bon sens implicitement contenue dans les indicateurs Ai. On pourrait la résumer comme suit : plus la ville offre de destinations (proches de préférence) susceptibles de répondre à un besoin donné d'un citadin, et plus il y a de chances pour que ce citadin en trouve une qui lui convienne bien. Les indicateurs d'utilité Ui reflètent non seulement les variations du coût de transport, mais aussi les variations de l'intérêt probable de la destination choisie, qui s'accroît lorsque la « liberté de choix » augmente.

ii) L'application de la théorie de l'utilité aléatoire (Ben-Akiva, Lerman, 1979)

Neuberger (Neuberger, 1971) est le premier auteur à avoir reconnu l'association entre les indicateurs d'accessibilité de Hansen et la mesure du surplus spatialisé du consommateur. Par la suite, les travaux de Ben Akiva et Lerman (Ben Akiva, Lerman, 1979) sur l'accessibilité partent du constat que les mesures d'accessibilité ne sont pas suffisamment fondées sur une théorie explicitement comportementale. Ils proposent alors de considérer une mesure de l'accessibilité qui soit cohérente avec l'application des modèles d'utilité aléatoire aux processus individuels de décision. Cette mesure est l'espérance du maximum d'utilité que le consommateur obtient à partir d'une situation donnée. L'accessibilité est envisagée comme étant le résultat d'une action effectuée à partir d'un ensemble d'alternatives de déplacement. Pour formaliser ce concept, on note l'ensemble des alternatives de déplacement *C*t, où l'indice *t* représente l'individu auquel se rapporte l'accessibilité ainsi déterminée. Les attributs de l'ensemble *C*t sont par définition mutuellement exclusifs et collectivement exhaustifs,

et une et seulement une alternative peut être choisie par *t* dans son processus de décision unique. On suppose que l'individu *t* associe une utilité à chaque alternative de l'ensemble *C*t, et que les individus choisissent l'alternative de *C*t qui maximise leur utilité. Les utilités sont supposées être des variables aléatoires notées *U*t = *(U*it,...,*U*nt*)* où *n* est le nombre d'alternatives dans *C*t. Sous ces hypothèses, Ben-Akiva et Lerman considèrent que l'accessibilité est simplement l'utilité procurée par le choix effectué par l'individu *t*. L'individu sélectionnant l'alternative qui maximise son utilité, et étant donné que l'utilité est définie comme une variable aléatoire, il vient alors :

Acct = E(Max Uit)

Les auteurs indiquent que, sous un ensemble de restrictions sur la distribution de *U*t, la valeur espérée du maximum d'utilité peut être considérée comme une mesure du surplus du consommateur.

iii) La théorie de l'accès (Martinez, 1995)

Certains auteurs, comme Martinez (Martinez, 1995), proposent d'interpréter la notion d'accès comme le lien économique entre le système d'occupation des sols et le système de transport. La notion d'accès, au sens plus large que celui d'accessibilité, est envisagée comme un élément qui révèle une connexion économique entre système de transport et système spatial urbain des localisations. L'auteur rappelle que si la définition de l'accès a posé des difficultés à de nombreux auteurs, celles-ci sont justifiées par le fait que l'accès est une notion abstraite appartenant à l'intersection de deux sous-systèmes : le transport et les activités, c'est-à-dire mouvement et espace. La notion physique de l'accès tente d'appréhender la relation qui existe entre la localisation spatiale des activités et les difficultés (distance, coût de transport) pour s'y rendre à partir d'une localisation donnée. Réciproquement, elle tente d'appréhender les difficultés qu'ont les individus à échanger à partir de n'importe quelle localisation. Les déplacements sont effectués dans l'objectif de « prendre contact », ce qui justifie l'importance de la notion d'accès. L'accès peut alors être défini comme l'avantage économique dérivé de l'interaction entre deux activités, qui est l'avantage net obtenu par la prise de contact avec les autres activités moins le coût d'interaction (le coût de transport). La notion d'accès recouvre deux dimensions. La première renvoie à l'accessibilité : c'est l'avantage obtenu par l'individu qui se déplace vers certaines opportunités. Elle est perçue directement par la personne qui se déplace. La seconde est l'attractivité : il s'agit de l'avantage obtenu en étant visité par d'autres activités. Puisque ces deux mesures représentent des avantages perçus, elles sont décrites par un vecteur plutôt qu'un scalaire. On suppose que H est le nombre de ménages et de firmes et que l'espace est divisé en *Z* zones homogènes. Alors :

acci = { acchi / h $\in$H, i $\in$Z }

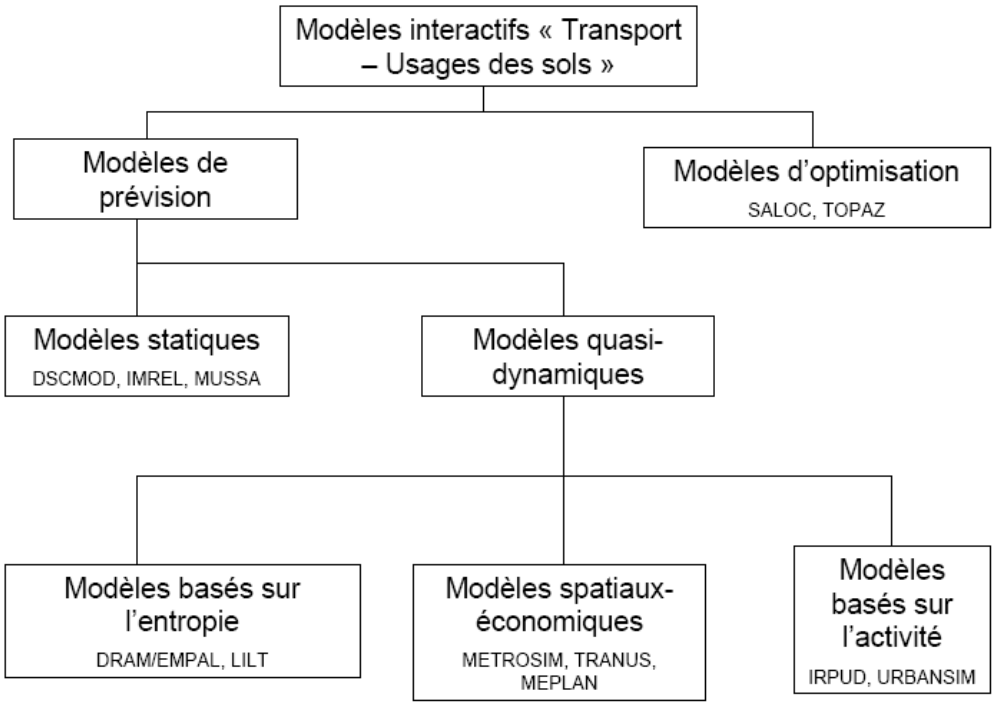
C'est le vecteur d'accessibilité à partir de la zone *i* pour l'individu *h*.

atti = { atthi / h $\in$H, i $\in$Z }

C'est le vecteur d'attractivité étant donné la localisation de l'individu *h* en *i*.

Un déplacement permet d'établir le contact entre au moins deux activités, affectant les deux extrémités de l'interaction. Ainsi, un déplacement génère des avantages (ou coûts). Ces avantages deviennent un surplus de localisation potentiel des activités (ménages ou firmes) qui est pris en considération lorsque les agents font leur choix de localisation.

Graphe 50 : Typologies des modèles interactifs « transport – usage des sols »



Source : Elaboration par l'auteur à partir de (Simmonds, Echenique, Bates, 1999)

Après avoir présenté les différentes techniques de modélisation utilisées par les modèles interactifs, nous discutons dans les trois sous-sections suivantes les différents modèles interactifs « transport – usage des sols » opérationnels existants. Simmonds, Echenique et Bates (Simmonds, 1996 ; Simmonds, Echenique Bates, 1999) présentent une typologie des modèles interactifs en cinq groupes. Cette classification s'intéresse d'abord aux finalités et aux possibilités offertes par les différentes familles de modèles interactifs. Nous la croisons avec d'autres typologies, notamment celles de Wegener (Wegener, 1994), de Clément (Clément, 1996), de Masson (Masson, 1998 ; 2000), de l'EPA (EPA, 2000) et de Waddell (Waddell, 2001). Nous critiquons ces différents modèles au travers du filtre des critères de choix de l'outil de simulation discutés dans la première section de ce chapitre.

C - *Les modèles interactifs d'optimisation*

Pour Simmonds, Echenique et Bates (Simmonds, Echenique Bates, 1999), le premier critère de classification des modèles interactifs est la finalité. Ainsi ils différencient un premier groupe de modèles, les modèles d'optimisation, ayant pour objet d'optimiser les configurations urbaines à la différence des modèles de prévision qui se donnent pour objectif de prévoir les effets des politiques de transport et d'urbanisme sur la structure urbaine. Les modèles d'optimisation sont utilisés afin de trouver le design des politiques qui optimisent une fonction particulière[118]. Ils tentent d'isoler l'évolution de la structure urbaine la plus désirable. Ils sont généralement utilisés dans une perspective de planification à long terme.

Les deux principaux modèles de cette catégorie sont SALOC et TOPAZ (TOPMET).

[118] A la différence des modèles de prévision qui répondent à un design défini comme input du modèle par l'utilisateur.

1) SALOC[119]

SALOC est appliqué à Uppsala, ville située dans la région urbaine de Stockholm (Suède). SALOC cherche à optimiser les localisations résidentielles en fonction des lieux d'activités, input du modèle. SALOC ne donne pas une représentation explicite des déplacements bien que l'affectation des sols dépende de calculs d'accessibilité. Les transports ne sont introduits que par le biais d'un indice de temps moyen de transport que l'on peut affecter à chaque zone en fonction de son éloignement moyen aux lieux d'emploi, aux lieux d'achat et à Stockholm (Stockholm étant une des destinations privilégiées des migrations alternantes de Uppsala). Etant donné les schémas de localisation des emplois et les caractéristiques des déplacements, il affecte la population (non désagrégée) aux zones de l'aire d'étude de façon à satisfaire un ensemble d'objectifs de bien-être définis en fonction de l'accessibilité, la densité de la zone en logements, etc.

2) TOPAZ[120] (TOPMET[121])

TOPAZ fut développé en 1970 pour la région urbaine de Melbourne (Australie) par Brotchie, Sharpe et Toakley. Le modèle détermine la distribution à la fois des emplois et des logements de façon à minimiser la somme pondérée des coûts de l'infrastructure urbaine et des coûts de transport subis. Contrairement au modèle SALOC, la représentation du système de transport est relativement plus sophistiquée. Les indicateurs de transport constituent en effet des éléments déterminants de la localisation (résidentielle et des activités). Le modèle présente une véritable phase de distribution des flux, fondée sur le principe de maximisation de l'entropie à double contrainte, ainsi qu'une phase de choix modal de type logit classique (entre le rail et la route). Ainsi, TOPAZ est à la fois un modèle d'optimisation des localisations et de prévisions des flux.

TOPAZ nécessite beaucoup de données exogènes pour l'année de base : les emplois, ménages et l'usage des sols par zone et par activité, le réseau de transport (liens, vitesse à vide et capacités), la matrice de déplacement, les temps et longueurs de déplacements. (Zhao, Chung, 2006).

3) Conclusions

Les modèles d'optimisation, du fait de leur finalité, ne sont pas adaptés à notre objectif. Ces modèles ne satisfont pas les critères de choix de l'outil de simulation définis en première section de ce chapitre. **Les modèles d'optimisation ne sont pas faits pour comparer les effets de politiques alternatives de transport et d'usage des sols** ; ils optimisent la structure urbaine par rapport à un objectif. De plus, **les modèles d'optimisation ne prennent pas en compte les temporalités d'évolutions des différents sous-systèmes urbains**. Ces modèles ne sont donc ni cohérents avec notre projet de recherche, ni pertinents avec notre objet d'étude.

D - *Les modèles interactifs de prévision statiques*

Parmi les modèles de prévision, Simmonds, Echenique et Bates distinguent deux classes de modèles : les modèles statiques et les modèles quasi-dynamiques[122]. Les modèles statiques s'appliquent à un moment donné dans l'espace-temps, alors que les modèles quasi-dynamiques fonctionnent sur plusieurs périodes de temps. Les modèles quasi-dynamiques peuvent ainsi prendre en

[119] Single Activity Location Model

[120] Technique for Optimal Placement of Activities Zones

[121] TOPMET est le développement de TOPAZ avec un niveau de détail plus

[122] Le terme « dynamique » est utilisé pour les modèles travaillant à un niveau de détail très élevé, sur des périodes de temps très courtes et lorsque l'utilisateur peut voir les véhicules bouger sur l'écran. (Clément, 1996).

compte les changements du système de transport qui nécessitent généralement plusieurs périodes de temps pour avoir un impact sur l'occupation du sol.

A l'instar du modèle METROPOLIS de Lowry (Lowry, 1964), les premiers modèles d'usage des sols étaient généralement statique. Plus récemment, dans les années 1990, d'autres modèles statiques ont été développés, tels que DSCMOD (Simmonds, 1991), IMREL (Anderstig, Mattson, 1991) et MUSSA (Martinez, 1992).

1) DSCMOD

DSCMOD a été développé par Simmonds (Simmonds, 1991) dans l'optique d'intégrer dans les modèles de transport les considérations relatives à l'occupation du sol et ainsi d'analyser les évolutions des usages des sols sous l'effet de différentes stratégies de transport. C'est donc un modèle d'usage des sols que l'on peut connecter à divers modèles de transport. La répartition modale et le calcul de l'accessibilité peuvent être effectués par le modèle de transport ou par DSCMOD directement. La relocalisation des ménages s'effectue en réponse aux évolutions de l'accessibilité zonale.

Ce modèle a été utilisé à Edinburgh, Merseyside, Bristol et Sao Paulo avec le modèle de transport START, à Bristol avec le modèle TRAM et à Dublin avec un modèle de coûts généralisés issus du modèle de transport SATURN. La région principale d'application de DSCMOD est l'Europe. Ce modèle a existé sous différentes formes depuis 1991 en utilisant une représentation ad hoc de l'offre de transport (transport de passagers et de marchandises). Il a permis notamment d'examiner les impacts du tunnel sous la Manche (Simmonds et Jenkinson, 1993), de la ligne TGV-EST (Paris-Strasbourg, 1993, 1994), etc.

Les modèles TRACKS et TRANSTEP développés par la Nouvelle Zélande et l'Australie sont similaires à DSCMOD (Simmonds, 1996).

2) IMREL

IMREL est modèle intégré de localisation résidentielle et d'emploi, développé par Anderstig et Mattson en Suède en 1991. Il nécessite un modèle de transport externe, généralement EMME/2.

Contrairement à DSCMOD, il estime les schémas d'équilibre des modes d'occupation des sols en tenant compte de l'accessibilité produite par le modèle de transport. Les ménages et emplois sont totalement agrégés (une catégorie pour chacun). L'objectif de IMREL est d'élargir les discussions vers la prise en compte des effets des investissements dans les infrastructures de transport, dans une situation où un modèle de transport est déjà utilisé.

3) MUSSA[123] (5-LUT)

Développé par Martinez (Martinez, 1992 ; 1997) pour la ville de Santiago du Chili, MUSSA est un modèle de simulation des marchés foncier et immobilier ; il est relié au modèle de transport traditionnel à quatre étapes ESTRAUSS, pour former le modèle interactif 5-LUT.

MUSSA se distingue de DSCMOD et IMREL sur plusieurs points. Contrairement à DSCMOD et IMREL, le modèle d'occupation des sols MUSSA et le modèle de transport ESTRAUSS, sont itérés jusqu'à l'équilibre, tout du moins jusqu'à atteindre certaines conditions d'équilibre si ce n'est pas toutes. Ensuite, il prédit l'occupation des sols en fonction d'un ensemble particulier d'inputs accessibilité. A l'instar de Simmonds, Echenique et Bates (Simmonds, Echenique, Bates, 1999), la littérature considère que la contribution majeure de MUSSA est de fournir des illustrations des travaux de Martinez sur la mesure de l'accessibilité présentés précédemment (cf. section II.B).

L'intérêt de MUSSA est donc son apport théorique. Outre les avancées dans la modélisation de l'accès, MUSSA constitue un nouveau type de modèle d'occupation des sols fondé sur la combinaison de deux approches : la théorie des enchères à la Alonso et l'approche de l'utilité aléatoire. Le concept d'offre d'enchère est remplacé par le principe plus opérationnel du consentement à payer pour un

[123] Modelo de Uso de Suelo de SAntiago

logement localisé en un endroit donné. Le principe de maximisation de l'utilité est substitué par celui de la maximisation du surplus du consommateur procuré par ses choix de localisation. MUSSA est un modèle d'équilibre pour l'offre et la demande immobilière. La demande immobilière est basée sur le consentement à payer. Les acheteurs cherchent à maximiser leur surplus, c'est-à-dire leur consentement à payer moins le prix d'achat, alors que les vendeurs cherchent à maximiser les prix de vente. Le stock immobilier est offert par les promoteurs qui maximisent leur profit, étant donnée la demande apparente.

MUSSA suppose que l'agent prend des décisions de localisation et de transport dans le but de maximiser son profit. Les localisations tiennent compte du niveau d'accessibilité des lieux. La localisation des activités affecte le consentement à payer pour les sols en modifiant les caractéristiques de voisinage de la zone ; celles-ci ont un impact sur les rentes foncières ce qui, en retour, peut modifier les localisations des activités. Elle affecte également la structure de la mesure d'accès à la zone, ce qui modifie ensuite le consentement à payer des sols, puis leur occupation.

L'équilibre spatial intervient lorsque la localisation des activités remplit deux conditions :

- chaque consommateur se localise à un endroit qui maximise son surplus pour un état donné des prix ;
- les prix sur le marché du sol sont fixés par la règle de la plus forte enchère.

Les mesures de l'accessibilité permettent de quantifier le surplus économique capté par les usagers du transport, ce qui permet au modèle d'occupation des sols de mesurer les bénéfices du transport.

Ainsi MUSSA trouve un équilibre statique pour une année de projection, en ajustant le niveau de stock immobilier offert, la réponse des vendeurs, le niveau d'utilité atteint par les acheteurs en consommant leur bien immobilier, la réponse des acheteurs, jusqu'à ce que la demande et l'offre s'équilibrent.

5-LUT est donc un modèle intégré de localisation et de transport à cinq étapes. Il est composé de deux sous modules :

- un module « bid choice » incluant les mécanismes de localisation et de rente, considérant le transport comme un attribut de la fonction de consentement à payer du sol,
- et un module de transport comportant les quatre étapes classiques du modèle standard.

5-LUT est particulièrement désagrégé relativement aux autres modèles. MUSSA utilise le zonage des analyses trafic, soit un niveau de détail élevé, 264 zones pour Santiago. Les ménages sont répartis en 65 catégories.

Malheureusement, 5-LUT pose des problèmes de mesurabilité, il est très exigeant en quantité et qualité des données. Pour cela, il n'a pu être appliqué que dans un cas : Santiago de Chile. Etant donné que la conformité entre la structure logico-mathématique et les réalités de l'objet « ville » n'est pas notre unique objectif, il nous semble opportun de privilégier l'opérationnalité dans l'effort de modélisation que nous poursuivons.

4) Critiques

Les modèles statiques ne représentent donc pas de façon réaliste les processus de changement urbain décrit par Wegener (Wegener, 1994). **Ces modèles ne reflètent pas le fait que seulement une certaine fraction des ménages et des actifs se déplace dans une période de temps donnée, et que les marchés fonciers et immobiliers s'ajustent continuellement vers un équilibre qui peut ne jamais être atteint**. Le développement urbain est un processus incrémental (Deymier, Nicolas, 2005).

Ces modèles sont toujours utilisés aujourd'hui pour deux raisons principales : ils constituent un moyen économe de prendre en considération les relations systémiques du développement urbain ; ils définissent un état d'équilibre dont l'intérêt est de caractériser, voir de quantifier les déséquilibres à l'origine des processus de changement urbain (Simmonds, Echenique Bates, 1999).

Nous ne retiendrons pas les modèles interactifs de prévisions statiques car ils ne satisfont pas l'exigence de pertinence définis dans la première section de ce chapitre : ils ne permettent pas de prendre en compte les temporalités d'évolution différentes des sous-systèmes urbains à considérer. Au travers des analyses de court et de long terme des relations fonctionnelles au sein du couple « transport – usage des sols » et de leurs effets sur la structure urbaine, nous avons mis en exergue dans la partie 2

de cette thèse l'importance pour le processus de structuration urbaine de ces différences de vitesses dans les transformations des sous-systèmes urbains.

E - *Les modèles interactifs de prévision quasi-dynamiques*

A l'instar de Simmonds, Echenique et Bates (Simmonds, Echenique Bates, 1999), nous pouvons distinguer parmi les modèles quasi-dynamiques ceux basés sur l'entropie (Wilson, 1968 ; LILT, Mackett, 1979 ; DRAM/EMPAL, Putman, 1995) qui sont des modèles complets mais sans base théorique solide ; les modèles spatiaux-économiques (MEPLAN, Echenique et al., 1990 ; MENTOR, Echenique et Partners, 1998 ; TRANUS, de la Barra, Perez, 1982 ; METROSIM, Anas, 1982) qui intègrent des modèles économiques indépendants dans un cadre spatial et donc présentent des bases théoriques reconnues comme solides ; et ceux basés sur les activités (DELTA, DSC, 1994, IRPUD, Wegener, 1983, URBANSIM, Waddel, 2000) qui correspondent aux derniers développement de la recherche modélisatrice sur les interactions « transport – usage des sols ».

1) Les modèles interactifs de prévision quasi-dynamiques basés sur l'entropie

Cette famille de modèle se fonde sur les travaux de Wilson (Wilson, 1967) que nous avons présenté précédemment.

a) DRAM/EMPAL (ITLUP, METROPILUS)

Le modèle DRAM/EMPAL développé par Putman (Putman, 1971 ; 1983 ; 1995) fut le modèle d'occupation des sols le plus appliqué aux Etats-Unis au début des années 1990 (Hunt et al, 2005).

Le graphe 51 présente l'architecture du modèle :

- Le module DRAM[124] est un modèle résidentiel contraint qui prévoit la localisation des ménages en fonction de l'accès aux emplois et de la quantité de terrain libre dans la zone ainsi que la probabilité des déplacements domicile - travail entre les zones. La mesure des accessibilités est basée sur les sorties de la période précédente du modèle de transport, introduisant donc un retard dans la réactivité des choix de localisation. DRAM calcule simultanément la génération et la distribution des déplacements.

- Le module EMPAL[125] est également un modèle contraint qui alloue la prévision de l'emploi exogène en utilisant une mesure d'attractivité de la zone (main-d'oeuvre), le niveau d'emploi préexistant dans chaque zone et la quantité de terrain libre. La classification de l'emploi et des ménages ne peut pas excéder huit secteurs.

DRAM et EMPAL réitèrent les calculs jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint.

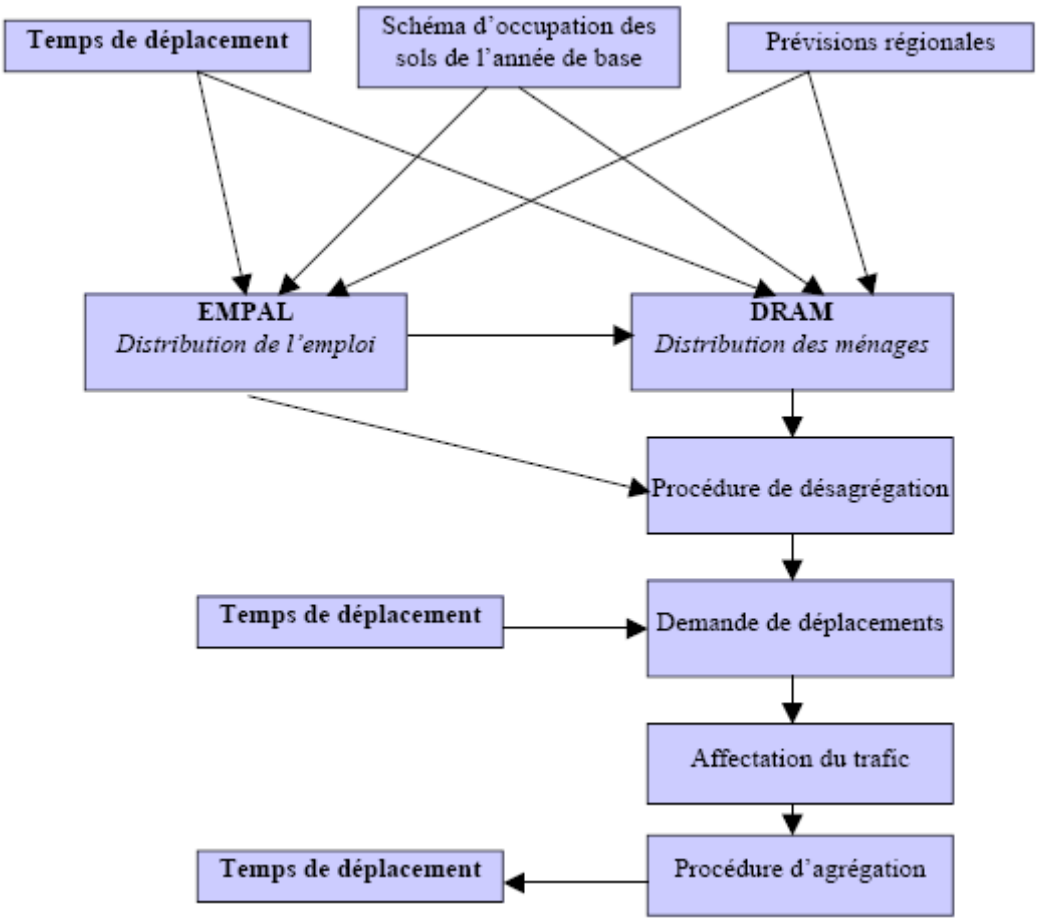
L'association de DRAM et EMPAL forme le modèle de localisation qui doit être connecté à deux modèles de transport, MSPLIT (modèle de répartition modale) et NETWK (modèle d'assignation des flux au réseau), pour former le modèle interactif ITLUP[126].

[124] Disaggregated Residential Allocation Model

[125] Employment Allocation Model

[126] Integrated Transportation and Land Use Package

Graphe 51 : Architecture du modèle DRAM / EMPAL



Source : Putman, 1995, cité dans Deymier, Nicolas, 2005.

DRAM/EMPAL nécessite un temps d'utilisation et d'expertise considérable (Miller, Kriger, Hunt, 1998). Son utilisation nécessite de l'entraînement et de l'expérience (EPA, 2000). Ainsi, les capacités des modèles DRAM/EMPAL sont rarement pleinement exploitées dans la pratique. Le temps et le coût d'exécution des modèles de demande de transport sont excessifs, et par conséquent souvent une seule itération est exécutée (Deymier, Nicolas, 2005). Brinckerhoff et Douglas (Brinckerhoff, 1996) recommandent pourtant d'itérer jusqu'à ce que les résultats des modèles de transport et d'urbanisation convergent ; autrement, les résultats risquent de ne pas être cohérents.

Le modèle DRAM tend à simplifier la connexion complexe qui existe entre l'emploi et les ménages, ce qui l'éloigne de la réalité. Les principales caractéristiques des ménages et de la démographie sont omises. Des tests de désagrégation ont été effectués, mais cela n'a apparemment pas conduit à une amélioration substantielle des prévisions. Ceci laisse à penser que le problème est davantage dû à la construction du modèle plutôt qu'à la non significativité de ces facteurs dans la localisation résidentielle. (Clément, 1996)

Il n'y a pas de procédure d'équilibre de marché : si un individu ou activité est assigné à une zone, la densité augmente. Il n'y a donc pas de possibilité de simuler des politiques d'usage des sols autre que le zonage urbain. Ainsi, le marché foncier n'est pas représenté et les effets sur le prix du sol des changements dans les services ou les politiques de transport ne peuvent pas être estimés. Sans une représentation du marché, il apparaît donc difficile de capturer des aspects clés du processus de développement urbain, ou bien de tester les nombreuses politiques publiques qui ont un impact sur le prix foncier et le développement. (Deymier, Nicolas, 2005).

Dans la pratique, il y a une incohérence entre le système zonal utilisé par DRAM/EMPAL et celui utilisé pour la modélisation du transport (EPA, 2000). Ceci a conduit à l'utilisation de techniques d'allocation pour désagréger les prévisions d'occupation des sols aux zones de trafic ainsi qu'à des techniques d'agrégation pour extraire la matrice des temps de transport générée par les modèles de

transports pour l'utiliser dans les modèles d'urbanisation. Cette incohérence peut causer des pertes d'information dans les modèles d'interaction et ainsi affecter la précision des prévisions. Putman et d'autres (Deymier, Nicolas, 2005) stipulent que le modèle ne fonctionne pas bien sur des zones fortement désagrégées ou bien lorsque l'activité est éparse.

Enfin ITLUP nécessite généralement l'implication d'un consultant expérimenté pour une application correcte et efficace (Zhao, Chung, 2006).

METROPILUS est une version améliorée en 1995 par Putman de ITLUP. Putman a ajouté une formulation de logit emboîté et la possibilité d'introduire des contraintes aux zones ce qui permet de limiter l'allocation d'activité dans une zone où il n'y a pas de terrain libre. Le modèle est intégré dans un environnement de système d'information géographique, ce qui permet de mieux visualiser les sorties. METROPILUS peut être connecté à d'autres modèles de transport, plus couramment utilisés, comme EMME2, TRANPLAN ou MINUTP.

b) LILT

LILT[127] a été développé par Mackett (Mackett, 1991 ; 1993) pour Leeds. Il simule les relations entre le transport et la distribution spatiale des ménages, emplois, magasins, de la construction immobilière et les usages des sols. LILT doit être relié à un UTMS classique.

Pour la construction immobilière, leur nombre est défini de façon exogène et LILT les distribue entre les zones en fonction de l'accessibilité et d'un coefficient de démolition défini à partir des périodes précédentes. Les appartements sont disponibles pour différentes catégories de population, sans simulation d'aucun marché – comme dans ITLUP il n'y a pas de procédure d'équilibre de marché. L'emploi par zone est aussi défini en interne à partir de prévisions exogènes sur l'emploi par secteur. A ce stade, la technique proposée par Wilson est appliquée et le modèle produit les localisations et les flux par modes qui seront assignés au réseau par des algorithmes traditionnels.

Le problème majeur de LILT est donc, comme pour ITLUP, de ne pas considérer les marchés foncier et immobilier, et donc les prix. De plus LILT est un modèle complexe, et son implémentation et calibration sont très difficiles (Clément, 1996).

c) Critiques

Dans les modèles basés sur l'entropie, le modèle de localisation spatiale est gravitaire, c'est-à-dire que la distribution spatiale des résidences et emplois est fonction de l'attractivité (calculée selon le poids, c'est-à-dire le nombre d'acteur dans la zone) et des coûts de déplacements associés à chaque zone. Une des limites de ces modèles est donc de **ne pas tenir compte de nombreux facteurs comportementaux influençant les choix de localisation**. Une autre limite est que **les marchés foncier et immobilier ne sont pas représentés**. Enfin ces modèles tendent à être limités dans leur degré de désagrégation spatiale (Waddell, 2001).

2) Les modèles interactifs de prévision quasi-dynamiques spatiaux-économiques

Les efforts de développement des modèles spatiaux-économiques se sont avant tout concentrés sur l'inscription des phénomènes socio-économiques dans leur dimension spatiale. Leur structure est cohérente avec les standards de la micro-économie traditionnelle, dans la mesure où ils s'attachent à représenter pleinement les mécanismes économiques théoriques du marché afin d'aboutir à l'équilibre entre offre et demande à la fois dans les comportements d'usage des sols et pour les transports (Deymier, Nicolas, 2005).

Trois grands modèles sont représentatifs de cette famille : MEPLAN (1982), TRANUS (1982) et METROSIM (1982). Nous présentons tout d'abord METROSIM car ce modèle développé par Anas

[127] Leeds Integrated Land Use Transport

(1982) constitue, du fait de l'intégration de la théorie de l'utilité aléatoire que l'on retrouve dans TRANUS et MEPLAN, une avancée théorique importante. Pourtant, METROSIM ne constitue pas un modèle spatial-économique puisqu'il n'adopte pas les matrices Entrées / Sorties spatialisées, qui sont au cœur de TRANUS et MEPLAN.

Puis nous étudions ensemble TRANUS et MEPLAN, considérés comme similaires par la littérature. Nous montrons pourquoi ces deux modèles sont adaptés à notre objectif de recherche, puis les raisons qui nous font choisir TRANUS et non MEPLAN.

a) METROSIM

Ce modèle est le résultat des recherches conduites par Anas depuis 1982 sur l'intégration des avantages théoriques procurés par les modèles d'utilité aléatoire de choix discret dans la représentation microéconomique d'un marché de localisation résidentielle. Anas propose une approche probabiliste de choix discret qui permet d'améliorer l'approche initiale d'Alonso basée sur une « fonction d'enchère » en modélisant de façon explicite la dispersion des préférences au sein de la population et en écartant l'hypothèse trop simplificatrice selon laquelle tous les ménages ont les mêmes goûts et les mêmes caractéristiques.

METROSIM est destiné à tester les politiques de transport et d'occupation de l'espace. Il contient une procédure d'analyse coût-bénéfice qui mesure deux types de bénéfices :

- Les variations d'utilité que les ménages retirent des accessibilités urbaines, et qui sont déterminées conjointement par les changements dans les transports et l'usage du sol.
- Les changements dans les valeurs de l'immobilier.

Sa structure théorique a été améliorée par une série de modèles opérationnels du marché du logement et du transport à Chicago (CATLAS), San Diego (CPHMM) et New-York (NYSIM) depuis le début des années 80.

La structure de METROSIM est basée sur une série de sept sous-modèles :

- L'industrie basique : la production de l'industrie basique de chaque zone est donnée de façon exogène. Le sous-modèle détermine de façon endogène la demande de travail, l'utilisation de la surface, les besoins de l'industrie de base en sol, les salaires et le niveau de la rente.
- L'industrie non basique : ce sous-modèle procède de la même façon que précédemment, excepté que le schéma de localisation initial est déterminé de façon endogène.
- La propriété : ce sous-modèle représente les marchés de la propriété résidentielle et du commerce séparément. Il détermine la quantité de construction et de démolition des unités résidentielles, aussi bien que les espaces vacants et les valeurs des marchés et de la rente dans chaque zone.
- Les espaces vacants : ce sous-modèle détermine la quantité et la valeur de marché de l'espace vacant disponible pour le développement dans chaque zone.
- Les ménages : c'est ici que se trouve déterminée la distribution des ménages résidents dans chaque zone par type d'unité résidentielle (individuel ou collectif), par lieu d'emploi, revenu du ménage et mode de transport- travail du chef de famille.
- Les déplacements : ils sont de deux sortes : domicile-travail et domicile-autres motifs. La matrice de demande des déplacements travail est calculée à partir d'un modèle unifié de localisation résidentielle, de choix d'emploi et de mode. Pour les autres motifs de déplacement, le sous-modèle calcule les fréquences des trajets et les configurations des déplacements par mode pour chaque destination. Ces nouveaux schémas influencent à leur tour la localisation des industries non- basiques.
- La répartition du trafic : les matrices de déplacements automobile sont affectées sur le réseau routier et les temps de parcours sont mis à jour pour tenir compte de la congestion.

Ce modèle diffère des deux modèles présentés ci-dessous car il n'adopte pas les matrices Entrées / Sorties spatialisées. De plus, il est significativement plus agrégé. Toutefois, de nombreuses similitudes apparaissent entre les modèles MEPLAN/TRANUS et METROSIM, notamment dans leurs structures mathématiques sous-jacentes et dans la façon de représenter les

marchés et de déterminer les prix de façon endogène. Cependant, l'échelle de segmentation limitée disponible dans METROSIM peut avoir un effet sur sa capacité à refléter pleinement la complexité des marchés en opération dans les villes. Enfin, si METROSIM s'accommode bien d'une utilisation sur des ordinateurs légers, **sa convivialité est réduite** par l'absence d'interface avec des Systèmes d'Information Géographique. Par ailleurs, METROSIM n'a été appliqué qu'aux Etats-Unis; **l'adapter à d'autres contextes urbains, notamment des villes pauvres en quantité et qualité des données, est incertain** (Deymier, Nicolas, 2005).

b) TRANUS et MEPLAN

Les deux équipes qui ont développé MEPLAN et TRANUS étaient basées dans le Centre for Land Use and Built Form Studies (LUBFS) de l'université de Cambridge, et depuis 1978 dans des firmes indépendantes, Marcial Echenique and Partners (MEP) pour MEPLAN et Modelistica pour TRANUS.

i) Les similitudes entre TRANUS et MEPLAN

MEPLAN et TRANUS sont les deux seuls LUTM qui prennent en compte les 8 sous-systèmes du développement urbain présentés précédemment (Wegener, 1993) : le réseau de transport, les usages des sols, les lieux d'emploi, la résidence, l'emploi, la population, le transport des marchandises et des personnes.

TRANUS et MEPLAN intègrent cinq techniques de modélisation :

- La théorie de la base développée par Hoyt ;
- Les matrices Entrées / Sorties développées par Leontieff auxquelles ont été ajoutées la dimension spatiale. Les matrices Entrées / Sorties constituent le cœur de TRANUS et MEPLAN. Elles sont utilisées pour déterminer les interactions entre les activités et pour en extraire la demande de transport. La production de l'activité économique (la sortie) consomme d'autres types d'activités comme entrées. Dans le processus de production, ces entrées consomment à leur tour d'autres entrées, et ainsi de suite. Pour conduire ce mécanisme, TRANUS et MEPLAN se basent sur la séparation entre activités basiques et activités induites de la théorie de la base ;
- Les techniques de maximisation de l'utilité (utilité aléatoire de choix discret) qui déterminent les choix de localisation, de mode de transport et d'affectation ;
- Les fonctions d'enchères développées par Alonso qui permettent de simuler des consommations de biens, services et espaces variant avec les prix et revenus ;
- L'équilibre de l'offre et de la demande par les prix. Tous les marchés simulés tendent chacun à l'équilibre mais il n'y a pas d'équilibre global à l'ensemble de ces marchés, du fait de l'inertie du système de localisation à s'adapter au système de transport.

TRANUS et MEPLAN comportent deux sous-modèles distincts qui interviennent successivement : un sous-modèle d'urbanisation et un sous-modèle de transport.

Le sous-modèle d'urbanisation estime la localisation des activités dans différentes zones, et s'équilibre selon les caractéristiques du marché. Les acteurs économiques de l'agglomération se localisent de manière à équilibrer l'offre et la demande de travail et de service avec pour stratégie de minimiser leurs frais de transport et de loyer. Le processus de localisation des activités fournit un ensemble de matrices Xmn,ij , représentant les flux fonctionnels générés par le secteur *m* (situé dans la zone *i*) vers les secteurs socio-économiques *n* (situé dans la zone *j*).

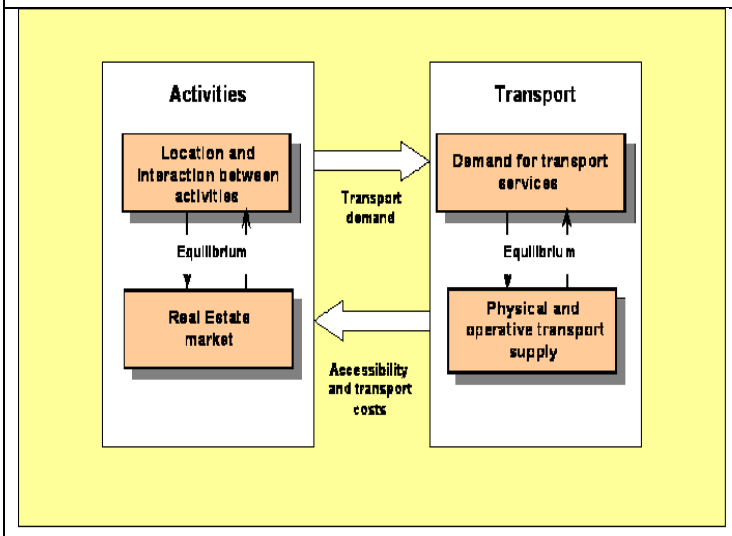
Une interface est assurée, ce qui permet de transformer les flux économiques qui résultent de la partie usage du sol en flux physiques qui seront affectés sur le réseau. En d'autres termes, les flux fonctionnels déterminent la demande de déplacement pour chaque paire Origine-Destination, et le modèle suppose que cette transformation est immédiate. Ainsi, les schémas d'activités de la période *t* déterminent la demande de transport de la période *t*.

Dans le sous-modèle transport, les matrices Origine-Destination ainsi générées, sont affectées sur le réseau. Pour chaque couple Origine-Destination, une désutilité de transport est calculée, prenant en compte les coûts généralisés sur chaque arc et pour chaque mode. Les coûts généralisés de transport sont, en retour, des composantes de la fonction d'utilité du modèle de localisation des activités.

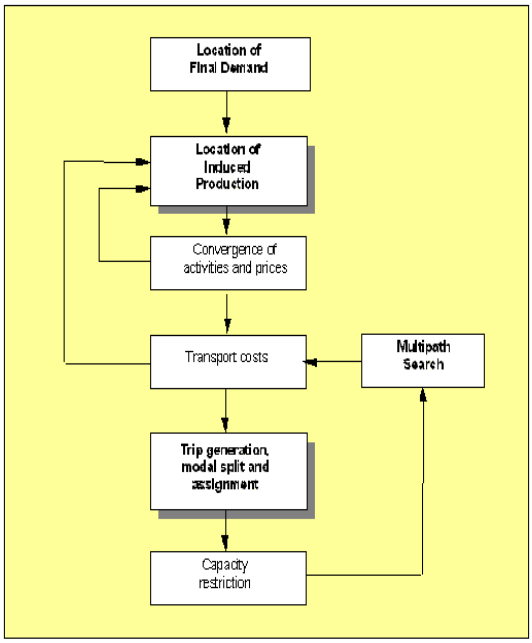
Les coûts de transport sont donc réintroduits dans le modèle de localisation, mais il est supposé que cette rétroaction ne se fait pas immédiatement. Elle se réalise à la période suivante (t+1). Cela représente l'inertie du système de localisation à s'adapter au changement du système de transport. A la séquence t+1, les acteurs se localisent en fonction de l'état du réseau à la séquence t, et l'affectation se fait sur le réseau à la séquence t+1.

Ainsi, la localisation des ménages et des emplois génère des déplacements qui sont affectés sur le réseau multimodal de transport. Les coûts généralisés de transport sont en retour injectés dans l'expression de l'utilité. Les disponibilités foncières et le réseau de transport sont modifiés à chaque horizon temporel, notamment de manière exogène par les politiques urbaines simulées. Les modèles calculent donc à chaque horizon temporel, la localisation des ménages et des emplois, l'évolution du prix du foncier, les déplacements et leurs affectations par mode sur le réseau. Les sous-modèles fonctionnent par périodes de temps basées sur des rétroactions entre transport et usage du sol. Ils opèrent par étapes de cinq ans vers une année horizon de prévision.

Graphe 52 : Principaux éléments de TRANUS



Graphe 53 : Séquence de calcul dans TRANUS



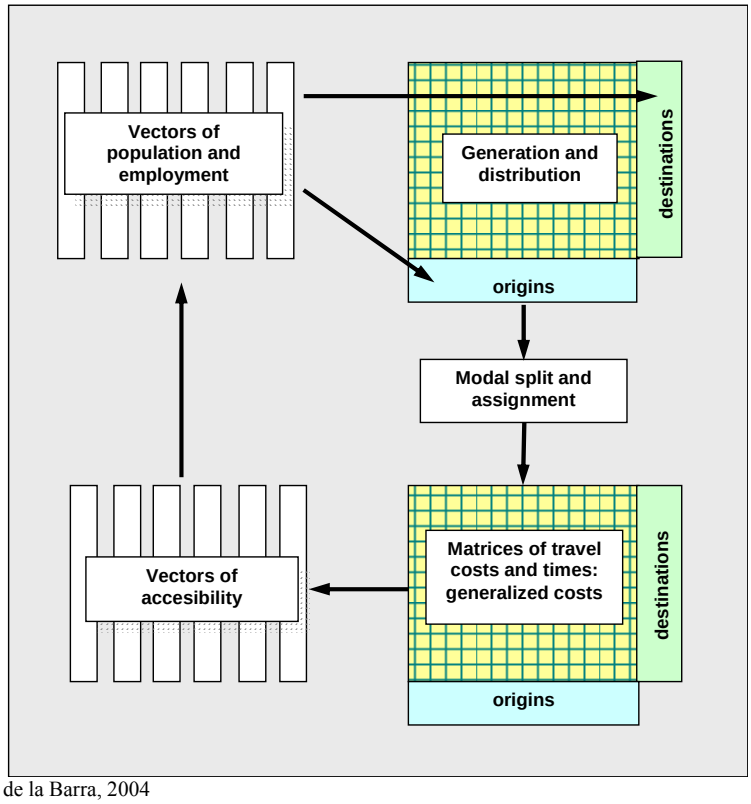
Source : www.modelistica.com

TRANUS et MEPLAN diffèrent de tous les autres modèles interactifs par la cohérence de l'interface entre le sous-modèle d'usage des sols et le sous-modèle de transport. Ces deux modèles sont des **modèles pleinement intégrés fonctionnant sur la base d'une interface « matrices vers matrices »,** et non comme les autres modèles qui adoptent une interface « vecteurs vers matrices vers vecteurs ».

Les modèles conventionnels à quatre temps utilisaient des données de population, d'emploi, et d'usage des sols sous forme vectorielle. A partir de ces vecteurs, les déplacements produits et attirés par chaque zone étaient également calculés sous forme vectorielle. Ces vecteurs étaient alors utilisés pour estimer la matrice de déplacements. Puis chaque cellule de la matrice était divisée en mode (privé ou public) et assignée au réseau. Du fait que les efforts de modélisation pour intégrer les rétroactions entre le système de transport et le système d'usage des sols se soient développés à partir des modèles de transports existants, les modèles interactifs ont conservé cette structure vectorielle. Les vecteurs des activités estimés par le sous-modèle d'usage des sols alimentent le sous-modèle de transport qui détermine les destinations des déplacements. Le module de distribution des déplacements calcule alors la matrice des déplacements, et à partir de cette étape les calculs deviennent matriciels. Chaque cellule

de la matrice était divisé en mode (privé ou public) et assigné au réseau. Après application de la procédure de contrainte de capacité du réseau, le modèle estime pour chaque cellule le coût et temps contribuant au coût généralisé de chaque déplacement, et la matrice obtenue alimente le sous-modèle d'usage des sols. Puisque ce dernier est basé sur une structure vectorielle, la matrice des coûts généralisés doit être agrégée, et passer d'une matrice à des vecteurs.

Graphe 54 : Articulation transport – usage des sols dans les modèles de type « vecteurs vers matrices vers vecteurs »



Source : de la Barra, 2004

Cette structure « vecteurs vers matrices vers vecteurs » permet certes d'intégrer les relations entre le système de transport et le système d'usage des sols, sans modifier la structure des modèles de transport quatre temps existants, mais elle **présente toutefois deux inconvénients** (de la Barra, 2004) :

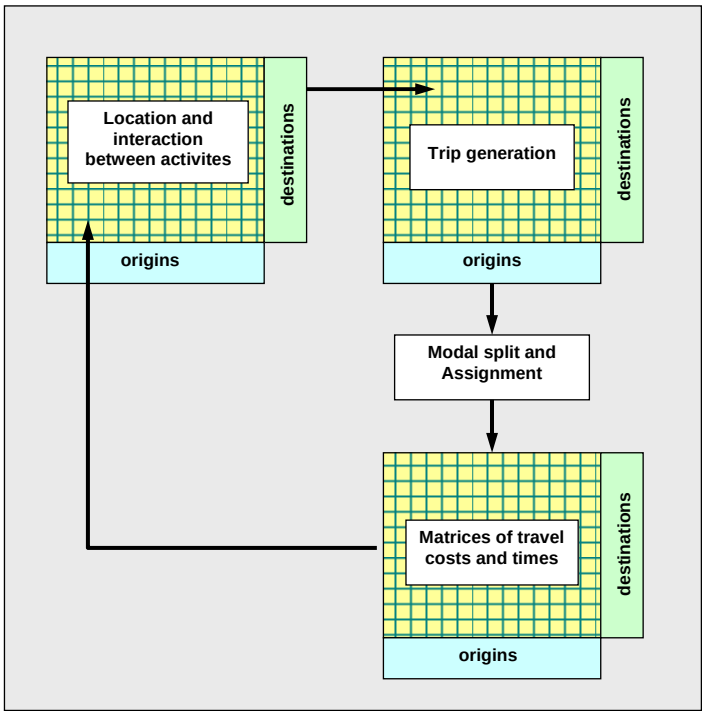
- lors de la transformation « matrice vers vecteurs » quand les coûts généralisés de déplacements sont introduits dans le sous-modèle d'usage des sols, des informations sont perdues. Il n'existe pas de méthodes satisfaisantes pour agréger les matrices de coûts généralisés en vecteur d'accessibilité. Les méthodes courantes utilisent des méthodes de moyennes pondérées et perdent la richesse des informations. Un changement conséquent affectant un segment du réseau de transport mais pas les autres peut être complètement dilué lors du processus d'agrégation, devenir insignifiant et produire des résultats similaires entre les scénarios avec et sans le projet.

- lors de la transformation « vecteur vers matrice », quand les résultats du sous-modèle d'usage des sols sont introduits dans le sous-modèle de transport, des incohérences peuvent apparaître. Le module de distribution suppose qu'il y ait une relation entre deux activités, de résidence vers emploi par exemple. Le modèle d'usage des sols suppose aussi qu'il y a cette relation au travers des vecteurs d'accessibilité, l'accessibilité à l'emploi par exemple. Le problème est qu'il n'y a aucune garantie de la consistance entre les deux, et les résultats peuvent être contradictoires. En reprenant l'exemple précédent, le gain d'accessibilité entre deux zones spécifiques peut ne pas se voir dans les vecteurs de population et d'emploi mais le modèle de distribution, parce qu'il est matriciel, va refléter ce changement et donc augmenter le nombre de déplacements.

TRANUS et MEPLAN résolvent ce problème en adoptant une structure « matrice vers matrice ». Le modèle d'usage des sols estime à la fois la localisation et les interactions entre les activités, et génère des matrices de flux fonctionnels. Cellule par cellule, les fonctions de génération des déplacements transforment la matrice des flux en une matrice des déplacements. Cette dernière est divisée en mode et assignée au réseau. Après application de la procédure de contrainte de capacité du réseau, le modèle estime pour chaque cellule le coût généralisé de chaque déplacement, et la matrice obtenue alimente le sous-modèle d'usage des sols, sans besoin d'agrégation. Dans ce schéma, si une amélioration sur le réseau de transport n'affecte qu'une seule cellule, cette amélioration est prise en compte tout au long du modèle sans perte d'information liée à un processus d'agrégation.

Cette stratégie apporte la cohérence et la pertinence requises à l'interface entre le module d'usage des sols et le module de transport.

Graphe 55 : Articulation transport – usage des sols dans les modèles de type « vecteurs vers matrices vers vecteurs »



Source : de la Barra, 2004

TRANUS et MEPLAN ont la capacité de tester les effets de différentes combinaisons alternatives de politiques transport et usages des sols.

Ce sont donc deux modèles très complets et cohérents car ils reposent sur des bases théoriques reconnues, mais difficiles à calibrer. D'autre part, ces modèles nécessitent une base de données complète pour l'année de base. (Clément, 1996)

Ces deux modèles sont les modèles interactifs les plus largement appliqués dans le monde, au niveau urbain comme interurbain.

ii) Critiques communes à TRANUS et MEPLAN

Une critique importante à ces deux modèles est qu'ils simulent des équilibres sur les différents marchés pour chaque période de temps. Si l'équilibre global du modèle peut ne pas être atteint, les sous-modules transport et localisation équilibrent offre et demande de déplacement, de foncier et d'emploi. Si ce résultat est robuste pour les déplacements (TRANUS et MEPLAN indiquent alors la demande non-satisfaite), les équilibres sur les autres marchés ne sont valides pour le marché foncier que si l'utilisateur considère toutes les catégories d'usage du foncier, notamment les usages informels, et pour le marché de l'emploi que si toutes les sources de revenu sont prises en compte, notamment les activités économiques informelles.

D'autre part, TRANUS et MEPLAN présentent deux limites :

- Ils **ne distinguent pas** (et donc n'articule pas) **le marché foncier et le marché immobilier**. Ces modèles simulent uniquement « l'utilisation des sols », c'est-à-dire la compétition spatiale pour la localisation entre les différentes catégories d'activités et de population, et donc seulement le marché foncier.

- Ils **ne simulent pas le comportement des promoteurs immobiliers** et ne modélisent donc pas les dynamiques des marchés foncier et immobilier. Les choix d'expansion urbaine et/ou de re-développement urbain ne sont pas considérés de façon endogène. TRANUS et MEPLAN laissent ce soin aux utilisateurs du modèle. A chaque pas de temps des projections, c'est en effet l'utilisateur qui décide, de façon exogène, en fonction de l'évolution des prix du sol sur l'ensemble de l'agglomération où vont se localiser les investissements de (re)construction immobilière et quel sera l'usage visé (catégories de population, d'activités). Nous remarquons qu'il est déjà intéressant que ces modèles laissent la possibilité aux utilisateurs, en fonction de leurs connaissances des dynamiques locales des marchés foncier et immobilier, de simuler « à la main » ces comportements. Ainsi l'ancrage dans la réalité est conservé.

iii) Les différences entre TRANUS et MEPLAN

Les différences entre TRANUS et MEPLAN peuvent être classées entre celles relevant du plan théorique et celles relevant du plan opérationnel.

Nous distinguons **trois différences théoriques entre MEPLAN et TRANUS** : la technique probabiliste choisie pour assigner les flux sur le réseau de transport ; l'utilisation de fonctions élastiques lors de la génération des déplacements et les techniques de modélisation employées pour simuler le choix de localisation des acteurs urbains.

Le module de transport de MEPLAN est basé pour l'affectation des flux au réseau sur l'algorithme probabilistique proposé par Dial (Dial, 1971), alors que TRANUS utilise un logit multinomial probabiliste (décrit ci-dessus). Comme Dial lui-même prévenait dans son article de 1971, son algorithme pose des problèmes d'asymétrie lorsqu'il est utilisé pour un réseau non-congestionné, notamment lors d'une application à l'échelle régionale (de la Barra, 1989 ; Abraham, 1998).

L'hypothèse sous-jacente au choix probabiliste de la route est que les flux ne vont pas toujours emprunter l'itinéraire ayant le coût minimal, mais plutôt s'éparpiller parmi différentes alternatives d'itinéraires. McLaughlin (McLaughlin, 1966) fut le premier à proposer une technique – « algorithme d'affectation multi-chemin avec capacité de restriction basé sur l'énumération des chemins » - satisfaisant cette hypothèse. Cet algorithme n'affecte pas tous les déplacements à chemin ayant le coût minimal, mais les répartit sur les n-chemins de moindre coût. Malheureusement la solution de McLaughlin, trop lourde pour les moyens techniques de l'époque, rencontrait beaucoup de difficultés opérationnelles. Dial (Dial, 1971) proposa un arrangement de la technique de McLaughlin plus économique en capacité de calcul. L'idée de Dial est de ne considérer que les chemins où le coût du trajet du deuxième nœud du réseau vers la destination finale est inférieur au coût du trajet de l'origine (le premier nœud du réseau) vers la destination finale ; et non, comme dans la technique de McLaughlin, de considérer tous les chemins possibles. La technique de Dial pose des problèmes d'asymétrie : si le réseau est relativement vide et la demande de déplacement symétrique (typiquement les voyages pendulaires domicile-travail quotidiens), les résultats de la technique de Dial peuvent être asymétriques, c'est-à-dire que les déplacements retour vont emprunter des chemins différents alors que le réseau est parfaitement symétrique (de la Barra, 1989).

Au contraire, le logit multinomial utilisé par TRANUS est parfaitement symétrique et ne rencontre pas ces problèmes aussi bien lors des applications répétées à l'échelle régionale qu'à l'échelle urbaine.

D'autre part, l'algorithme de Dial ne permet pas de calculer le coût composite associé à un déplacement, alors que le logit multinomial de TRANUS le permet, et de manière robuste. Cela est particulièrement dommageable aussi bien pour les évaluations des scénarios que pour la rétroaction vers le module d'usage des sols au travers de l'accessibilité.

MEPLAN, contrairement à TRANUS, n'inclut pas de fonction élastique (à la congestion notamment) dans le calcul de la génération des déplacements ; ce qui le rend moins réaliste et altère les évaluations.

Enfin, dans le module d'usage des sols, les fonctions de demande dans MEPLAN offre le choix entre une forme élastique ou une forme basée sur le logit ; mais il est impossible de combiner les deux.

L'idée est de remplacer les coefficients techniques fixes des matrices de Léontieff – qui relient chaque secteur aux autres secteurs - par des fonctions élastiques.

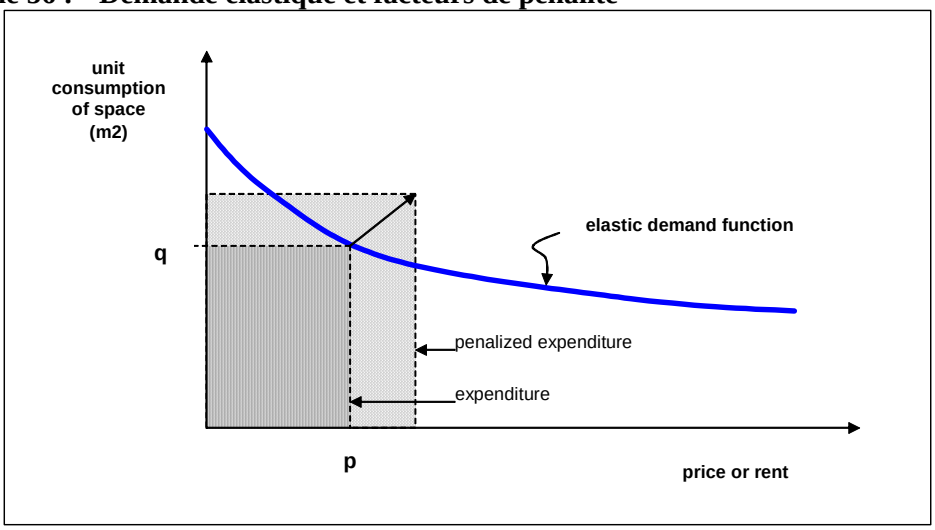
TRANUS permet de combiner les deux, ce qui est essentiel pour représenter le marché foncier. En effet, pour représenter le comportement des ménages ou des entreprises, TRANUS détermine le choix de localisation en combinant le choix du type de sol (par exemple, résidentiel forte densité, résidentiel faible densité ou mixte pour un ménage) et l'élasticité de cette demande au prix du sol.

Malheureusement, MEPLAN ne permet pas cela. L'utilisateur est donc réduit à opter pour une fonction de demande élastique au prix. Ainsi, dans MEPLAN, les acteurs décident combien de sol ils vont consommer, mais pas quel type de sol. Il est pourtant évident que les deux paramètres – type et quantité – doivent être pris en compte dans le même modèle.

De plus, cela permet à TRANUS d'être plus pertinent dans la simulation du fonctionnement du marché foncier : si la production d'un bien est contrainte, le prix qui résulte normalement de la somme des coûts accumulés le long de la chaîne de production peut être remplacé par un prix d'équilibre, c'est-à-dire le prix qui égalise la demande et l'offre. Ainsi les terrains ne peuvent pas être transportés depuis une autre zone (leur production dans chaque zone est contrainte), ils sont donc consommés selon des fonctions élastiques et donnent lieu à un prix d'équilibre, générant la rente foncière.

Enfin, de la Barra a introduit dans TRANUS des facteurs de pénalité pour simuler les possibilités de substitutions et les préférences par catégorie d'acteurs et catégorie de sol. Ces éléments de substitution permettent de simuler le fait qu'une consommation peut être satisfaite par plusieurs secteurs. Par exemple, un commerce peut avoir à choisir entre un sol commercial, un sol résidentiel de haute densité et un sol résidentiel de faible densité. Parce que la demande est élastique, la fonction d'utilité du modèle de choix discrets comporte des facteurs de pénalité. En considérant un point de la courbe de demande de sol où une quantité q est consommée au prix p. La dépense de l'acteur sera le rectangle (pq), et la dépense pénalisée sera $(pq)w$, avec w le facteur de pénalisation. (de la Barra, 2004)

Graphe 56 : Demande élastique et facteurs de pénalité



Source : De la Barra, 2004

A ces trois différences, nous devons ajouter l'avancée théorique, présentée précédemment (sous-section III.B.2.b.), **intégrée dans TRANUS et non dans MEPLAN : la hiérarchisation des utilités dans les logit multinomiaux emboîtés**.

Enfin notons que les efforts de recherche de son concepteur, T. de la Barra, et l'actualisation continue du modèle aux avancées théoriques majeures en fonction de leurs opérationnalités, testées au

travers des nombreuses applications dont il a fait l'objet, font de TRANUS un modèle interactif continuellement renouvelé et à la pointe de la recherche.

Il existe **deux différences opérationnelles importantes entre TRANUS et MEPLAN** : la convivialité de l'interface utilisateur et l'accessibilité du modèle.

MEPLAN ne possède pas d'interface conviviale avec l'utilisateur. Ce dernier doit travailler avec un ensemble complexe de fichier texte ; ce qui peut devenir une difficulté pratique majeure à mesure que les scénarios et les périodes de temps se multiplient.

TRANUS possède au contraire une interface utilisateur très conviviale basée sur Windows,. L'accès à la base de données est simplifié. Des fonctions offrent une aide interactive, des valeurs par défaut, des procédures de recherche des erreurs, etc. Un aspect intéressant est d'avoir l'ensemble des scénarios sur une même base de données accessibles par un « arbre à scénario » indiquant les relations logiques entre les différents scénarios simulés. Pour tracer le réseau de transport, il est possible d'importer les cartes SIG en fond d'écran et l'édition est facilitée par un ensemble d'outil. L'interface génère les rapports présentant les résultats sous forme de graphiques et de tableaux. Enfin, TRANUS est accompagné d'un ensemble de documents explicatifs, d'exemples et de travaux dirigés didactiques.

TRANUS est un logiciel en accès libre téléchargeable sur le site internet de Modelistica. Tous les documents sont disponibles librement sur internet. Outre l'avantage coût, cet accès libre au logiciel permet à une plus grande communauté de chercheurs et de praticiens de se saisir de TRANUS et d'émettre des suggestions en vue de l'amélioration du système. Le code source de TRANUS est aussi ouvert, dans le cadre d'un accord de recherche ou d'exploitation à passer avec son concepteur. De la Barra est disponible aussi bien pour répondre aux questions des utilisateurs que pour participer à des recherches en vue de l'amélioration de TRANUS. (EPA, 2000).

MEPLAN n'est disponible que dans le cadre d'une restrictive et coûteuse licence annuelle : USD 35.000 par an.

Enfin, nous ajouterons que les applications de TRANUS dans divers pays en développement, en Amérique Latine notamment, garantissent de son opérationnalité dans un contexte pauvre en données.

3) Les modèles interactifs de prévision quasi-dynamiques basés sur l'activité

L'approche des modèles basés sur l'activité se focalise sur les différents processus de changement qui affectent les activités et les espaces qu'elles occupent, à la différence des modèles spatiaux-économiques qui se concentrent sur la représentation des interactions entre différents usages des sols à une période de temps particulier. Les modèles basés sur l'activité se caractérisent par une segmentation plus détaillée de l'activité et un traitement plus élaboré des décisions de déplacement et des choix de localisation. Contrairement à d'autres modèles, ils ne relocalisent pas toutes les activités à une période de temps donnée mais ils séparent les décisions de déplacement (qui affecteront seulement une part des activités totales) et la recherche d'une nouvelle localisation. En outre, ces modèles représentent les changements démographiques de façon plus détaillée.

Plusieurs modèles peuvent être classés dans cette catégorie : IRPUD (Wegener, 1982), URBANSIM (Waddell, 1994), MASTER (Mackett, 1990), DELTA (Simmonds, 1998). Nous ne présentons ici que les deux premiers, IRPUD et URBANSIM, car ils constituent les avancées théoriques les plus marquantes et sont les deux modèles interactifs basés sur l'activité ayant une historicité reconnue.

a) IRPUD (DORTMUND)

IRPUD est le nouveau nom du modèle DORTMUND développé par Wegener (Wegener, 1982 ; 1983 ; 1985) pour la ville de Dortmund.

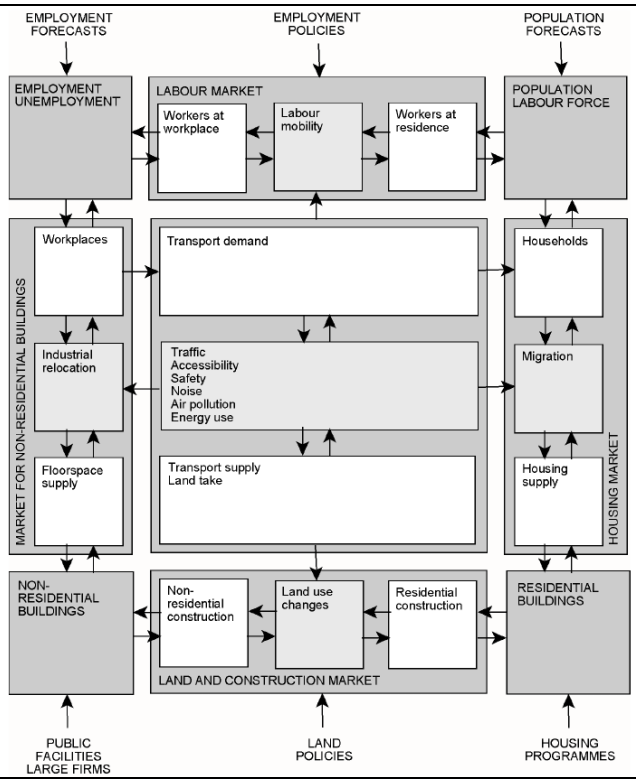
Wegener considère que les différents processus d'évolution urbaine ont leurs propres dynamiques lesquelles ne répondent que graduellement aux autres aspects du système urbain. Aussi IRPUD est constitué d'un ensemble de sous-modèles indépendants reliés par une toile de décalage temporel. Les sous-modèles sont (graphe 57) :

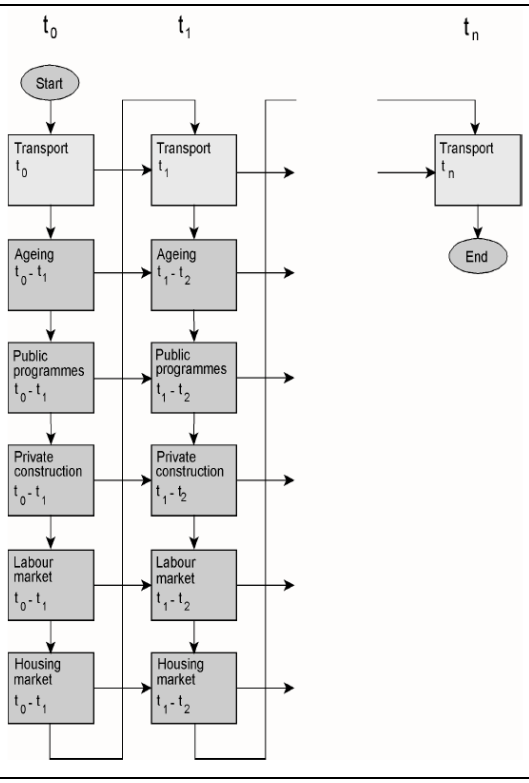
- Le sous-modèle de transport, qui estime les déplacements pour le travail, les achats, les services et l'école pour quatre groupe socio-économiques et trois modes de transport (vélo / marche à pied, transport en commun, voiture) ;
- Le sous-modèle de vieillissement, qui calcule les évolutions dans les stocks de variables telles que l'emploi, la population, les ménages - évolutions provenant de tendances biologiques, technologiques ou socio-économiques de long terme ;
- Le sous-modèle de programme public, qui introduit tous les programmes d'investissements publics dans les infrastructures, les logements, la santé, l'éducation, les loisirs, etc. ;
- Le sous-modèle de construction privée, qui simule les décisions d'investissement et leurs localisations de la part des promoteurs immobiliers ;
- Le sous-modèle de marché du travail, qui modélise la mobilité du marché du travail telle que les décisions des travailleurs de changer leur lieu de travail ;
- Le sous-modèle de marché immobilier, qui simule les décisions de migration résidentielle.

Si le modèle de transport est un modèle d'équilibre faisant référence à un point temporel, tous les autres sous-modèles sont incrémentaux et se réfèrent à la période de temps précédente.

Le graphe 57 présente une schématisation des principaux sous-systèmes considérés dans le modèle et les interactions entre chacun d'eux, ainsi que les instruments de politiques urbaines les plus importants. Le modèle présente quatre variables de stocks : la population, les emplois, les logements résidentiels, les constructions non résidentielles (locaux industriels, ou commerciaux, équipements publics). Les acteurs urbains associés à ces stocks sont des individus ou des ménages, des actifs, des promoteurs immobiliers et des firmes. Les agents interagissent sur cinq sous-marchés urbains : le marché du travail, le marché des locaux non résidentiels, le marché des logements, le marché des sols et des constructions, et le marché des transports. Les choix sur chaque sous-marché sont contraints par l'offre (le niveau d'emplois offerts, les stocks de locaux industriels et commerciaux disponibles, les logements inoccupés, les parcelles de sol vacantes, la capacité des réseaux de transport). Ces choix sont également guidés par des variables d'attractivité, qui sont des indicateurs de qualité et de prix. Les variables exogènes sont : les prévisions de l'emploi régional et de la population soumise à des tendances économiques et démographiques de long terme ou des politiques dans le domaine du développement du logement, des équipements publics et du transport.

Graphe 57 : Architecture du modèle IRPUD





Source : Lautso, 2004.

Le modèle IRPUD est très détaillé. Son objectif est ambitieux : il se propose d'évaluer les conséquences en termes de structuration spatiale et de transport de l'évolution économique appréhendée par l'évolution de l'emploi dans chaque secteur (quarante secteurs sont représentés dans ce modèle, alors que dans les autres, ils n'étaient que quelques-uns, au maximum une quinzaine) et de la population elle-même très fortement désagrégée en fonction de critères socio-économiques en trente catégories de ménages et quatre-vingts catégories d'individus (les autres modèles ne dépassant pas quatre catégories en l'occurrence). Dès lors, l'analyse de l'espace urbain va se voir fixer d'autres objectifs, comme celui d'analyser le vieillissement de la population et des infrastructures, tandis qu'une variable comme le taux de motorisation est aussi envisagée dans ses liens avec l'activité économique.

L'ensemble de ce processus est modélisé par le recours à la théorie de l'utilité aléatoire, enrichie de petits modèles d'évolution des individus et des infrastructures et de détermination du taux de motorisation. L'indépendance des différents sous-modèles autorise l'utilisation de techniques de modélisation différentes. Pour ce qui est de la localisation des individus, le modèle considère à la fois la modélisation de la demande suivant la théorie de l'utilité aléatoire, et la modélisation de l'offre de logements sous une forme logit prenant en compte l'espace disponible dans la zone et l'utilité retirée par le promoteur de la construction d'un même type de logement dans cette même zone lors de la période précédente.

Le modèle de transport est également très complet. Il intègre de nombreux motifs et modes de transport. Il présente une détermination interne de la motorisation en fonction du budget transport des familles et du coût d'entretien d'un véhicule, une phase de distribution des flux sur le principe de maximisation de l'entropie contrainte à l'origine et à destination pour le travail et pour l'école et seulement à l'origine pour les achats de biens et services ; intègre une phase de choix du mode, et enfin présente une phase d'affectation sur le réseau avec capacité contrainte. Ce modèle de transport est itéré plusieurs fois jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint.

IRPUD prend en compte aussi bien les politiques globales affectant la ville en tant qu'élément de la région que les politiques urbaines locales. IRPUD intègre des hypothèses sur le comportement

humain tirées de l'analyse géographique, ce qui en fait un modèle très pertinent par rapport à la réalité, notamment dans la modélisation du comportement élastique de génération de déplacement. (EPA, 2000), et donc un modèle plus pertinent de planification urbaine, mais peu cohérent avec l'objectif spécifique de notre thèse.

Le modèle est par contre limité par le découpage de la ville en zone de taille importante (EPA, 2000 ; Zhao, Chung, 2006). IRPUD n'a été appliqué que sur la ville de Dortmund, ce qui met en question l'exigence de mesurabilité et donc limite considérablement son opérationalité. Dans les programmes ISDGLUTI[128] (Webster, Paulley, 1990) et PROPOLIS[129] (Lautso et al, 2004) financés par l'Union Européenne, alors qu'un des tests pour évaluer la validité des modèles disponibles était de croiser les applications de différents modèles sur les mêmes villes, il n'a pas été possible d'appliquer IRPUD à une des autres villes européennes participant. Si cela n'est pas possible avec les moyens dont disposaient ces programmes et les données existantes dans les villes européennes, il est très peu probable que nous réussissions à l'appliquer à une ville pauvre, dans le cadre d'une thèse. Enfin notons que IRPUD n'est pas commercialisé : seul un partenariat avec Wegener permet de l'utiliser.

b) URBANSIM

URBANSIM a été développé par l'Urban Planing Department et le Computer Science Department de l'université de Washington pour l'aire métropolitaine de Eugene-Springfield (Waddell, 1994). URBANSIM est un modèle de localisation ; il doit être connecté à un modèle de transport.

URBANSIM est un modèle de choix discret qui se base sur la théorie de la maximisation de l'utilité aléatoire. Sa structure désagrégée est basée sur l'estimation des changements sur de courtes périodes de temps. Il détermine le marché de la demande immobilière à chaque localisation, ainsi que les acteurs et les processus de choix qui influencent la configuration de l'espace urbain et le prix sur le marché immobilier.

URBANSIM est un modèle fortement désagrégé. Les ménages sont classifiés en fonction de leur revenu, du nombre de personne et d'actifs, et de la présence d'enfant(s). L'emploi est réparti en 10 à 20 secteurs. Le foncier est catégorisé en 24 types et les variables incluent la superficie, le type de logement. Les ménages ont été divisés en 111 catégories dans la première application de URBANSIM à Eugene-Springfield (Miller, Kriger, Hunt, 1998). Le modèle opère à une échelle très fine : la ville est quadrillée en cellules de 150 mètres carrés, soit 271 zones pour l'application de Eugene-Springfield, 761 pour Honolulu et 1000 pour Salt Lake City.

Il est composé de plusieurs sous-modèles simulant les choix des ménages, des actifs, des promoteurs et des autorités et le fonctionnement des marchés foncier et immobilier (Wadell, 1994) :

- Un sous-modèle de transition démographique simule l'évolution de la population (naissance et décès) et un ajustement proportionnel itératif est utilisé pour déterminer combien de ménages de chaque type vont se créer ou disparaître.
- Un sous-modèle économique de transition fait de même dans le secteur des emplois.

---

[128] L'étude l'International Study Group on Land Use / Transport Interaction (ISGLUTI) lancée sous l'impulsion du United Kingdom Transport and Road Research Laboratory en 1981 a réalisé une étude comparative sur les principaux modèles disponibles (Webster, Paulley, 1990). Ce programme de recherche a notamment mis en évidence que la localisation endogène des activités semble être une nécessité difficilement contournable (les modèles introduisant la localisation de façon exogène produisent en effet des variations d'amplitude plus importante que ceux qui les endogénéisent) ; le recours à des méthodes de modélisation trop rudimentaires conduit à des résultats dont la pertinence est inférieure à celle des autres ; la désagrégation de la population en différentes catégories ainsi que celle des activités paraît être relativement importante dans la qualité des résultats (Duchier, 1991).

[129] Le programme PROPOLIS a débuté en 2000 et fut financé par la Direction Générale Recherche (DG XII) de la Commission Européenne (5ème programme cadre de la R&D). Ce projet consiste à mettre au point une méthode d'aide à la décision en matière de gestion urbaine, par simulation sur ordinateur de scénarios d'évolution urbaine liant occupation du sol / transport / environnement. Les logiciels utilisés furent MEPLAN, TRANUS et IRPUD (Dortmund), considérés comme les trois modèles les plus avancés (Lautso, K. et al, 2004).

- Les sous-modèles de mobilité des emplois et des ménages simulent les décisions de déménagement et de relocalisation des ménages et des emplois. Les probabilités de mouvement sont basées sur des données historiques. Un modèle logit multinomial est alors utilisé pour allouer les ménages et les emplois mobiles aux nouveaux lieux d'emploi et de résidence. Les variables utilisées dans le modèle de choix de localisation des ménages comprend des attributs de logement dans la parcelle (prix, densité, âge), des caractéristiques de voisinage (densité, accessibilité aux services, valeurs foncières moyennes, etc.) et l'accessibilité régionale aux emplois. Le modèle de localisation des emplois contient des variables de caractéristique du marché immobilier dans la parcelle (prix, densité, âge, type d'espace), de voisinage (valeur foncière moyenne, niveau d'emploi dans les autres secteurs, etc.) et l'accessibilité régionale à la population.

- Un sous-modèle de fonctionnement du marché immobilier simule les choix des promoteurs sur le type de construction à entreprendre et le lieu. Pour ce faire, un modèle logit multinomial est utilisé. Les variables contiennent les caractéristiques de la zone (développement en cours, contraintes politiques, amélioration de la valeur foncière), les caractéristiques de la localisation du site (proximité d'une autoroute, d'une grande voie de communication, développements existants et récents) et l'accessibilité régionale à la population.

- Un sous-modèle de prix foncier simule les prix du sol de chaque zone d'étude en suivant les changements des caractéristiques des localisations au cours du temps. Le modèle est calibré à partir de données historiques et utilise une régression des prix hédoniques permettant d'évaluer les effets de la zone, du voisinage, de l'accessibilité et des politiques de planification sur le prix du sol. Il permet également d'incorporer les effets des fluctuations locales et régionales de court terme sur l'ensemble des prix du sol.

- Enfin, l'accessibilité est mesurée à partir d'un sous-modèle de transport externe (initialement calibré sur un modèle à quatre étapes) qui peut être exécuté par période de cinq ans dans la simulation, ou lorsque survient un changement majeur dans le système de transport. Cependant, URBANSIM fonctionne annuellement mettant ainsi à jour les valeurs de l'accessibilité basées sur le schéma de développement spatial des activités.

Grâce à son approche comportementale et son haut degré de résolution spatiale, URBANSIM est particulièrement pertinent. Depuis l'expérience initiale à Eugene-Springfield, URBANSIM suscite un engouement certain. Aux États-Unis, il est aujourd'hui appliqué dans 5 régions urbaines (Eugene-Springfield, Honolulu, Houston, Wasatch Front dans l'Utah et Puget Sound dans l'état de Washington) et est en cours de développement dans 5 autres (Denver, Detroit, Phoenix, El Paso, San Antonio) (Waddell, 2005). Il est également en phase d'implantation en Europe à Amsterdam, Zürich, Lyon et Paris (Deymier, Nicolas, 2005). Le logiciel et le code source de URBANSIM sont en accès libre, ce qui favorise sa diffusion. Mais si URBANSIM est en accès libre, il semble que les manuels et rapports techniques ne permettent pas encore une prise en main facilitée du modèle (Zhao, Chung, 2006).

Par contre, URBANSIM est très exigeant en quantité et qualité des données (EPA, 2000). Le recueil et la préparation des données puis l'implémentation du modèle est particulièrement long (Zhao, Chung, 2006). De plus, la calibration du modèle nécessite la connaissance de logiciels statistiques et économétriques afin de réaliser les multiples régressions et l'estimation des modèles logit.

Ensuite, URBANSIM est un modèle de localisation ; aussi il est nécessaire de développer un modèle d'interface entre URBANSIM et un modèle de transport afin de convertir les sorties d'un des deux modèles en entrées pour l'autre (Zhao, Chung, 2006).

Enfin, URBANSIM nécessite un ordinateur doté d'une puissance de calcul très élevée (Zhao, Chung, 2006). Pour l'application d'URBANSIM sur le Comté de Volusia, Floride, un ordinateur 3,4 GHz Pentium avec 2 GB de RAM fut utilisé, et chaque simulation durait approximativement trois heures (Zhao, Chung, 2006).

Pour toutes ces raisons, URBANSIM ne peut être retenu dans notre projet de recherche. Il ne satisfait pas les critères définis dans la première section.

c) Critiques

A l'instar du programme lancé par de Palma pour connecter URBANSIM et METROPOLIS, l'avenir est peut être à l'association des modèles de transport avec les modèles de localisation basé sur la micro-simulation. Cependant, aujourd'hui, **les modèles basés sur l'activité n'ont pas encore un historique d'application suffisant** (Zhao, Chung, 2006), séparément et évidement associé à des modèles de transport. Des améliorations restent à effectuer (Zhao, Chung, 2006). D'autre part, ces modèles sont **très exigeants en qualité et quantité de données**, autant pour le modèle de transport que pour le modèle de localisation. Ensuite, ils sont **très lourds à implémenter et à calibrer**. Enfin, ils **requièrent des ordinateurs à forte capacité**. Ainsi ces modèles ne semblent pas adaptés ni aux contextes des villes pauvres du Sud ni à notre projet de recherche, compte tenu de notre problématique et des contraintes financières, humaines et temporelles propres à un travail de doctorat.

F - *Conclusions*

Ainsi lorsque l'on passe les différents modèles urbains présentés dans cette section au crible des critères définis en première section, le modèle TRANUS se dégage progressivement.

Les modèles d'optimisation tels TOPAZ ou SALOC ne correspondent pas à notre ambition de recherche. Les modèles statiques tels que IMREL, DSCMOD ou MUSSA ne permettent pas d'envisager de réelle boucle interactive entre transport et urbanisme. Tout au plus, l'état des transports initialement fourni au modèle est intégré dans l'explication des résultats d'occupation des sols. Les modèles quasi-dynamiques basés sur l'entropie comme LILT ou DRAM/EMPAL, s'ils intègrent mieux cette boucle, ne passent pas par une représentation des prix du marché immobilier et foncier. Or, nous l'avons vu, outre son apport dans la compréhension du processus, ce marché nous permettra de montrer comment les ménages peuvent se redistribuer sur le territoire en fonction de leur revenu.

TRANUS, MEPLAN, METROSIM, IRPUD et URBANSIM présentent, à des degrés différents, de solides bases théoriques. Ils sont notamment fondés sur une base micro-économique qui leur permet de simuler fort convenablement les marchés fonciers. Ils fournissent une structure logique conduisant à une estimation quasi-dynamique des interactions entre transport et développement du sol. Enfin, ils offrent la possibilité de prendre en compte un réseau de transport multimodal, permettant ainsi de considérer des possibilités de substitution.

Les modèles basés sur l'activité tels que IRPUD et URBANSIM, n'ont pas encore un historique d'application suffisant. D'autre part, ces modèles ne satisfont pas les critères d'opérationnalité requis pour notre projet de recherche : ils sont très exigeants en qualité et quantité de données ; ils sont très lourds à implémenter et à calibrer ; enfin ils requièrent des ordinateurs à forte capacité.

Dans les modèles spatiaux-économiques, l'adoption des matrices Entrées / Sorties apporte la cohérence et la pertinence requises à l'interface entre le module d'usage des sols et le module de transport. TRANUS et MEPLAN ont la capacité de tester les effets de différentes combinaisons alternatives de politiques transport et usages des sols. Ces deux modèles sont les modèles interactifs les plus largement appliqués dans le monde, au niveau urbain comme interurbain.

Ensuite des différences aussi bien sur le plan théorique (la technique probabiliste choisie pour assigner les flux sur le réseau de transport, l'utilisation de fonction élastique lors de la génération des déplacements et les techniques de modélisation employées pour simuler le choix de localisation des acteurs urbains, la hiérarchisation des utilités dans les logit multinomiaux emboîtés) que sur le plan opérationnel (la convivialité de l'interface utilisateur et l'accessibilité du modèle) nous poussent à choisir TRANUS.

Enfin, concernant le critère de potentialités de partage d'expériences et d'acquisition de connaissance, TRANUS apparaît idéal. En effet, c'est un modèle public accessible directement en ligne avec sa documentation, ce qui permet à quiconque d'apporter des améliorations, contrairement aux autres modèles qui sont des propriétés privées. Il a la réputation d'être mis au point par un

universitaire, de la Barra, qui répond facilement aux problèmes exposés par ses utilisateurs[130] (EPA, 2000).

IV - Présentation de TRANUS – SETU

Dans cette quatrième section, nous présentons le modèle TRANUS et le complétons par la Signature Energétique des Transports Urbains (SETU), traduction des effets des politiques transport et d'usage des sols sur la structure urbaine en termes de consommations d'énergie et d'émissions de CO_2.

A - *Présentation de TRANUS*

1) Description du modèle TRANUS

Le modèle TRANUS a été développé par de la Barra et Perez depuis 1982.

TRANUS est un modèle interactif de prévision quasi-dynamique qui peut être appliqué à l'échelle urbaine ou régionale. Il a deux objectifs : premièrement, la simulation des effets probables des politiques d'urbanisation et des projets de transport ; deuxièmement, l'évaluation de ces effets aux niveaux social et économique.

TRANUS permet de simuler les évolutions plausibles du système urbain ; c'est un modèle de prévision, c'est-à-dire qu'il estime les résultats d'action(s) particulière(s) sur le système de transport et/ou sur l'usage des sols, sur une période de temps donnée.

Il permet donc d'une part d'effectuer un diagnostic du système urbain actuel et d'autre part de tester différents scénarii de politiques urbaines :

- sur le système de transport :
  - Instruments économiques : régulation du trafic par un péage urbain, par le prix des carburants, par une tarification incitative du transport public, tarification du stationnement, etc.
  - Investissement dans les infrastructures de transport : création de nouvelle infrastructure (autoroute, métro, Bus Rapid Transit, et.) selon différentes configurations, amélioration des services de transport public (site propre pour les bus, augmentation de la capacité des véhicules, augmentation du nombre de véhicule, etc.), réorganisation du réseau routier, construction de pistes cyclables, etc.
  - Amélioration de l'intermodalité : intégration tarifaire, construction d'infrastructure d'intermodalité (park&ride), etc.
- et sur le système d'usage des sols :
  - au niveau des zones urbanisables : limitation ou extension des zones urbanisables, viabilisation de parcellaire, etc.
  - au niveau des modes d'urbanisation : politique de densification, de mixité sociale, de mixité fonctionnelle, etc.

TRANUS a déjà été appliqué à l'échelle d'une ville, d'un quartier, d'une région et d'un pays. Il est donc réellement capable de tester différents modes d'urbanisation.

L'aire d'étude est divisée en plusieurs zones à l'intérieur desquelles il faudra renseigner les éléments nécessaires à la description des systèmes de transport et d'usage des sols. Nous distinguons les inputs initiaux, c'est-à-dire les données exogènes requises pour décrire la période de référence de la simulation (t=0), des inputs d'étape, c'est-à-dire les données exogènes intervenant au cours d'une

[130] Ce que nous avons vérifié en travaillant avec Tomas de la Barra par internet puis durant les deux mois de stage que nous avons effectué à Caracas (Venezuela) dans son bureau d'étude.

période ultérieure à la période de référence (t>0). Les politiques urbaines que nous simulons font donc partie de la catégorie des inputs d'étape.

TRANUS nécessite des informations sur :

- Le foncier :
  - Inputs initiaux : le type de sols (résidentiel, commercial, industriel, non urbanisable, etc.), les droits attachés, le prix et la densité, etc. Il est préférable de disposer d'un Système d'Information Géographique (SIG) pour entrer tous ces inputs initiaux dans le modèle.
  - Inputs d'étape : les modifications dans le type de sols et dans les droits attachés.
- La population :
  - Inputs initiaux : les différentes catégories de revenus, la demande maximale et minimale de produits des autres secteurs et son élasticité, les substitutions possibles, les coûts de productions,
  - Inputs d'étape : les modifications des inputs initiaux et le taux de croissance des différentes catégories de populations.
- L'activité économique :
  - Inputs initiaux : les types d'activité, le nombre d'emploi par activité, la production des secteurs basiques, la fonction de demande des secteurs induits (la demande maximale et minimale de produits des autres secteurs et son élasticité, les substitutions possibles, les coûts de production, etc.), la capacité maximale et minimale de production, etc.
  - Inputs d'étape : les modifications des inputs initiaux et le taux de croissance des activités basiques.
- Les infrastructures de transport :
  - Inputs initiaux : le tracé du réseau de transport (route, piste cyclable, corridor réservé au bus, ligne de métro, etc.) et ses caractéristiques pour chaque catégorie d'infrastructure et sous-catégories si besoin (hiérarchie dans la voirie par exemple) (opérateurs autorisés, capacité de charge, longueur, vitesse à vide pour les différents opérateurs de transport, paramètre décrivant l'évolution de la vitesse en fonction de la congestion, sens et direction de circulation autorisés, coût de maintenance minimal, etc.). Il est préférable de disposer d'un Système d'Information Géographique (SIG) pour entrer tous ces inputs initiaux dans le modèle.
  - Inputs d'étape : les modifications des inputs initiaux, les créations de nouvelles infrastructures (voirie, ligne de métro, piste cyclable, corridors réservés au bus, etc.) avec leur tracé et caractéristiques.
- Les catégories de passager :
  - Inputs initiaux : différentes catégories (par motif et classe de revenus) et leurs caractéristiques (valeur du temps d'attente, valeur du temps de déplacement, taux maximum et minimum de génération, élasticité de la demande de déplacement, taux de motorisation, etc.).
  - Inputs d'étape : les modifications des inputs initiaux.
- Les opérateurs de transport :
  - Inputs initiaux : les catégories d'opérateurs et les caractéristiques de chaque catégorie (l'occupation de l'espace (Passenger Car Unit, PCU), le taux d'occupation maximal et moyen du véhicule, les coûts de maintenance et d'opération en fonction de la distance et du temps, le coefficient de pénalisation par catégorie de passager (représentant la hiérarchie des préférence entre les différents opérateurs pour chaque catégorie de population se déplaçant), le nombre de véhicules sur chaque ligne, la structure tarifaire et la fréquence de passage pour les modes de transport en commun, etc.).
  - Inputs d'étape : les modifications des inputs initiaux, les caractéristiques des nouveaux opérateurs.

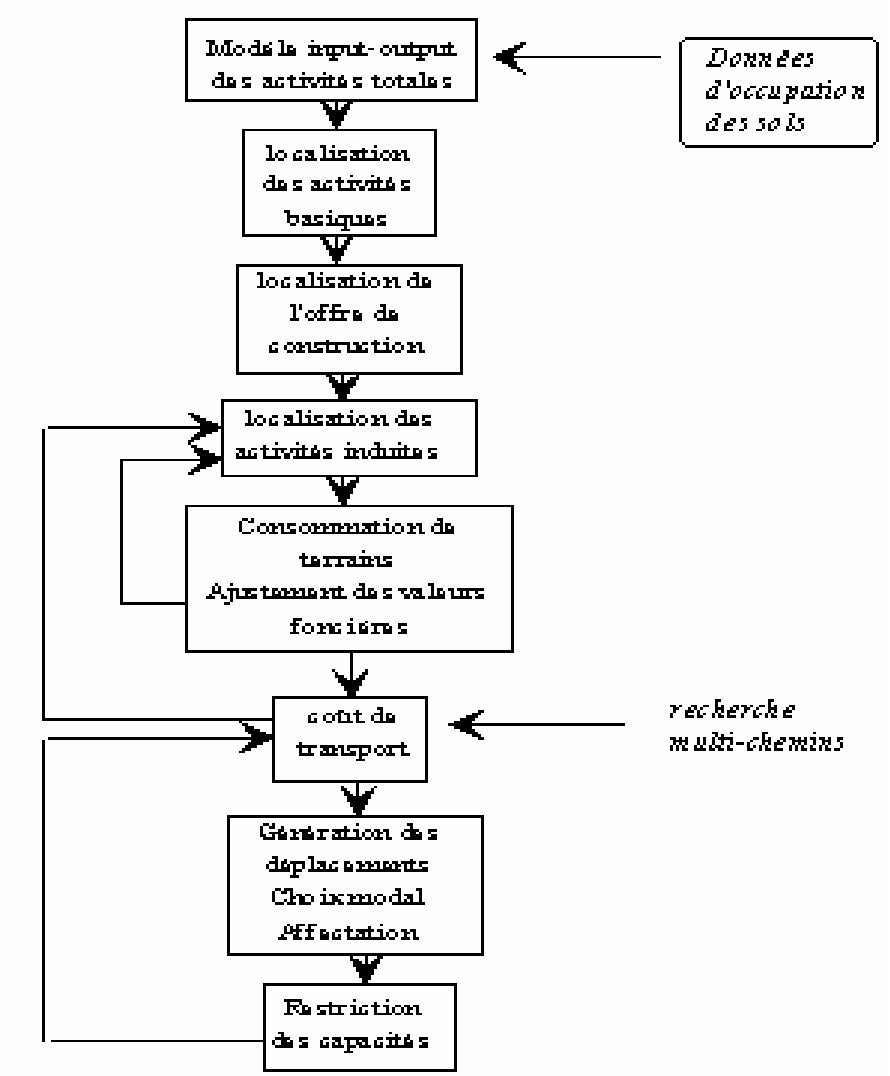
Les inputs initiaux et d'étape sont définis à un niveau urbain global et au niveau de chaque zone urbaine.

L'utilisateur de TRANUS décide du niveau de détail auquel toutes les catégories (géographiques, démographiques, économiques, etc.) seront renseignées, selon ses objectifs et les informations disponibles.

Les outputs du modèle TRANUS sont :

- Les évolutions de la structure spatiale urbaine : la localisation des activités et des ménages dans l'espace urbain, la distribution spatiale des prix fonciers,
- L'évolution du trafic par catégorie de passager, mode, opérateur et paire origine-destination
- Des évaluations économiques : élasticité de la demande au tarif des transports, l'évolution de l'utilité des différentes catégories de population par zones urbaines, etc.
- Des évaluations financières : retour sur investissement pour des infrastructures nouvelles, taux couverture des coûts d'opération, de maintenance, etc.

Graphe 58 : Structure générale du modèle TRANUS

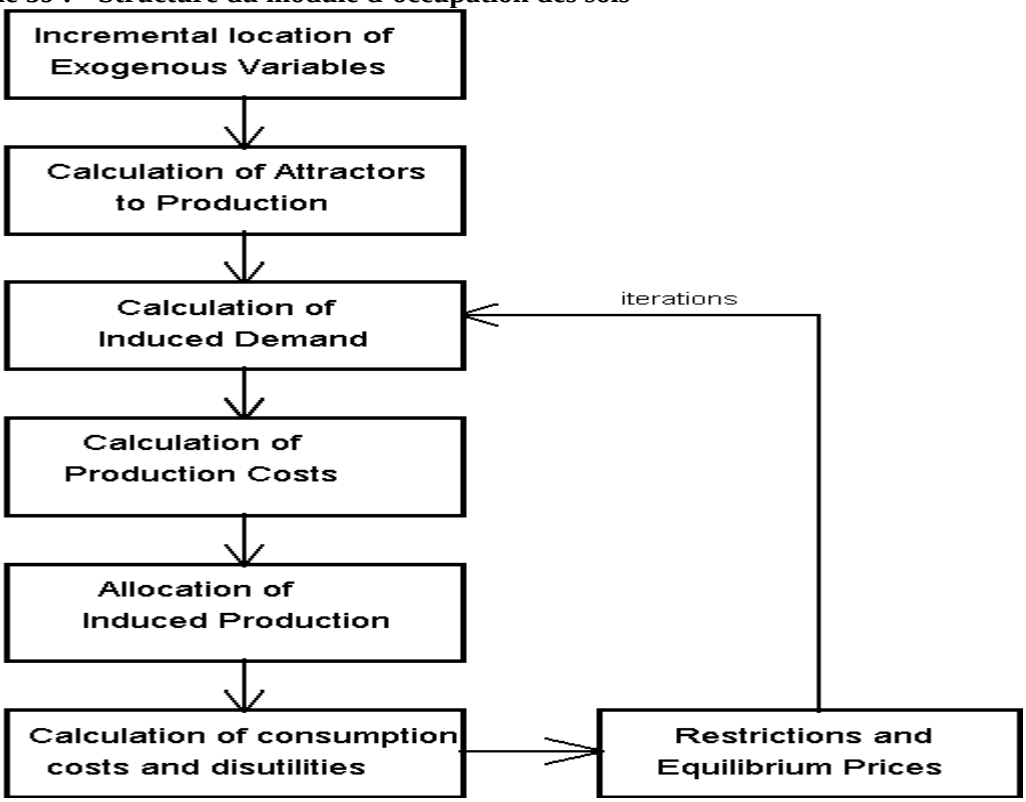


Source : Masson, 2000

2) Les calculs dans le module d'occupation des sols[131]

Le module d'occupation des sols est fondé principalement sur cinq techniques de modélisation exposées précédemment : la théorie de la base, les matrices Entrées/Sorties spatialisées, la maximisation de l'utilité aléatoire de choix discret, les fonctions d'enchères développées par Alonso, et l'équilibre de l'offre et de la demande par les prix. Nous présentons ici les différentes étapes des calculs effectués par le module d'occupation des sols. Ces étapes sont schématisées dans le graphe 59.

Graphe 59 : Structure du module d'occupation des sols



Source : www.modelistica.com

a) Localisation de la variation incrémentale des variables exogènes

La première étape de la séquence de calcul du module d'occupation des sols est l'estimation de la localisation de la croissance des variables exogènes pour chaque secteur et dans chaque zone urbaine. Les variables exogènes susceptibles d'être modifiées à chaque période sont : la production exogène, la consommation exogène, la capacité de production, les exportations, les importations et les facteurs d'attraction initiaux. Les variations incrémentales de ces variables sont des inputs du modèle.

Les incréments sont d'abord définis à un niveau global. Le modèle les localise ensuite dans des proportions résultant des fonctions d'attraction propre à chaque zone.

Si $X_i^{*n,t}$ est la production exogène du secteur n dans la zone i à la période t, alors

$$X_i^{*n,t} = X_i^{*n,t-1} + \Delta X^{*n,t} \rho_i^{n,t} + \Delta X_i^{*n,t}$$

Où

$X_i^{*n,t-1}$ production exogène du secteur n dans la zone I à la période t-1

[131] De la Barra nomme ce module « module d'activité ». Nous utilisons indifféremment ces deux appellations dans cette section.

$\Delta X^{*n,t}$ variation incrémentale globale de la production exogène du secteur n entre t-1 et t

$\Delta X_i^{*n,t}$ variation incrémentale de la production exogène du secteur n dans la zone i entre t-1 et t

ρ_i^{nt} proportion de la variation incrémentale de n allouée à la zone i pour la période t

La proportion de la variation incrémentale globale allouée à chaque zone est fonction d'une fonction d'attraction :

$$\rho_i^{n,t} = \frac{A_i^{n,t}}{\sum_i A_i^{n,t}}$$

Où A_i^{nt} est le facteur d'attraction du secteur n de la zone i à la période t. La fonction d'attraction est définie :

$$A_i^{n,t} = \sum_k b^{nk} \left(\alpha^{nk} \widetilde{X}_i^{k,t-1} + \beta^{nk} p_i^{k,t-1} + \chi^{nk} Q_i^{k,t-1} \right)$$

Où

b^{nk} poids de l'attraction du secteur k dans l'attraction du secteur n;

$\widetilde{X}_i^{k,t-1}$ production totale (exogène et induite) de k dans I à la période t-1

$p_i^{k,t-1}$ prix de k dans I à la période t-1

$Q_i^{k,t-1}$ excès de capacité (contrainte maximum – production totale) de k dans I à la période t-1

α^{nk}, β^{nk}, χ^{nk} paramètres de l'importance relative de chaque élément

Ainsi plusieurs secteurs k interviennent dans l'attraction d'un secteur spécifique n et le poids de chacun est régulé par $b^{nk.}$

b) Calcul des fonctions d'attraction pour les activités induites

Le module calcule les fonctions d'attraction qui serviront pour la localisation de la production induite :

$$A_i^{n,t} = \left(\sum_k b_k^n \left(\widetilde{X}_i^{k,t-1} \right) \right) W_i^{n,t}$$

Où

$\widetilde{X}_i^{k,t-1}$ production totale (exogène + induite) de k attirant n dans la zone i

b_k^n poids de l'attraction du secteur k dans l'attraction du secteur n

$W_i^{n,t}$ facteur d'attraction initial de la zone i prenant en compte des éléments non-modélisés.

c) Estimation de la demande induite

La quantité d'inputs qu'une unité de production d'un secteur exige d'un autre secteur est déterminée par une fonction de demande. Le modèle inclut comme options une demande fixe (équivalente aux coefficients techniques dans un modèle d'entrée-sortie), une demande variable (élastique) et la possibilité de substitution spécifique. La terre est un exemple typique d'un produit substituable quand les différents types de terre sont présents dans le système, telles que celles de faible densité, de forte densité, industrielle, commerciale, etc...

La formule générale de la fonction de demande est :

$$a_i^{mn} = \min^{mn} + \left(\max^{mn} - \min^{mn}\right) \cdot \exp\left(-\delta^{mn} U_i^n\right)$$

Où

a_i^{mn} quantité de production du secteur n demandée pour la production d'une unité du secteur m dans la zone i.

$\min^{mn}$ quantité minimale de n nécessaire à la production d'une unité de m

$\max^{mn}$ quantité maximale de n nécessaire à la production de m

δ^{mn} paramètre d'élasticité de m par rapport au coût de l'input n

U_i^n désutilité de la consommation de n en i

Ensuite le module calcule un élément prenant en compte la présence de substitut dans la fonction de demande. Cet élément est estimé avec un modèle logit multinomial de la forme :

$$S_i^{mn} = \frac{\exp\left(-\delta \widetilde{U}_i^{mn}\right)}{\sum_k \exp\left(-\delta \widetilde{U}_i^{mk}\right)} \qquad \forall k, n \in K^n$$

Où K^n est l'ensemble des substituts de n, et $\widetilde{U}_i^{mn}$ est le terme d'utilité échelonnée du modèle de substitution, défini par

$$\widetilde{U}_i^{mn} = \frac{a_i^{mn} \widetilde{c}_i^n \varpi^{mn}}{\left[\min_k \left(a_i^{mk} \widetilde{c}_i^k \varpi^{mk}\right)\right]^{\theta^m}}$$

Où $a_i^{mn} \widetilde{c}_i^n$ est la quantité de n que le secteur m souhaite consommer dans la zone i multiplié par le coût de consommation de n dans i ; il représente donc la dépense. Cette dépense est à son tour multipliée par ϖ^{mn} qui agit comme un facteur de pénalisation. Le dénominateur de l'équation échelonne l'utilité en divisant l'utilité par la meilleure option, c'est-à-dire celle qui est le moins pénalisée. Enfin θ^m définit le degré de l'échelonnage.

La quantité d'input n demandée par le secteur m dans la zone i est donc:

$$D_i^{mn} = \left(X_i^{*m} + X_i^m\right) a_i^{mn} S_i^{mn}$$

La demande totale d'inputs n dans une zone i est obtenue par :

$$D_i^n = \sum_m D_i^{mn} + D*_i^n$$

Avec

D_i^n la demande totale de n dans la zone i,

$D*_i^n$ la demande exogène de n dans la zone i.

Lors de la première itération, le module calcule uniquement la production exogène et la production directement induite par la production exogène. Lors des itérations successives, les demandes induites par la production de tous les secteurs lors de l'itération précédente sont additionnées.

d) Estimation des coûts de production

Les coûts de production sont calculés par addition des coûts de consommation de tous les inputs nécessaires et des valeurs ajoutées.

$$c_i^m = \left(\sum_n D_i^{m\,n} \widetilde{c}_i^n \right) + VA_i^m$$

Où VA_i^m est la valeur ajoutée à la production de m et $\widetilde{c}_i^n$ est le coût de consommation de l'input n dans la zone i.

e) Localisation de la production induite

Une fois que la quantité de production demandée par chaque zone a été estimée, sa production doit être distribuée entre les zones. Si un secteur est non-transportable, toute la production est assignée à la zone dans laquelle elle est demandée. Si le secteur est transportable, la demande est distribuée entre les différentes zones avec un modèle logit multinomial, dans lequel la fonction d'utilité dans chaque zone est :

$$U_{ij}^n = \lambda^n \left(p_j^n + h_j^n \right) + t_{ij}^n$$

Avec

p_j^n prix de n dans la zone de production j

h_j^n prix caché (« shadow price ») de n dans la zone de production j

t_{ij}^n désutilité du transport de n de la zone de production j vers la zone de consommation i

λ^n paramètre régulant l'importance relative du prix par rapport à la désutilité du transport

Le prix caché (« shadow price ») est estimé lors de la phase de calibration.

Les résultats du calcul précédent sont divisés par l'utilité de la meilleure option afin d'obtenir un utilité échelonnée :

$$\widetilde{U}_{ij}^n = \frac{U_{ij}^n}{(\min_j U_{ij}^n)^{\theta^n}}$$

Ces utilités échelonnées sont rentrées dans le modèle logit multinomial pour estimer la probabilité que la production de n demandée dans la zone i se localise dans la zone j :

$$\mathrm{Pr}_{ij}^n = \frac{(A_j^n)^{\alpha^n} \cdot \exp\left(-\beta^n \widetilde{U}_{ij}^n\right)}{\sum_j (A_j^n)^{\alpha^n} \cdot \exp\left(-\beta^n \widetilde{U}_{ij}^n\right)}$$

$$X_{ij}^n = D_i^n \, \mathrm{Pr}_{ij}^n$$

Avec

X_{ij}^n production de n localisée dans la zone j induite par des activités de consommation dans la zone i

A_j^n facteur d'attraction de la production n dans j,

α^n paramètre régulant l'importance relative du facteur d'attraction par rapport à la fonction d'utilité pour la localisation de n,

$\widetilde{U}_{ij}^n$ utilité échelonnée de la localisation de n dans la zone j pour satisfaire la demande de la zone i,

β^n paramètre de dispersion du modèle logit multinomial.

Au final, la production induite totale localisée dans une zone obtenue en additionnant la demande de toutes les zones :

$$X_j^n = \sum_i X_{ij}^n$$

f) Calcul des coûts de consommation

Une fois la demande assignée aux zones de production, les coûts de consommation – c'est-à-dire le prix que doit payer un secteur m localisé dans i pour la consommation d'un input de n - sont calculés. Puisque des achats sont dispersés dans l'espace, une moyenne est calculée à partir du prix payé dans chaque zone de production plus les frais de transport correspondants.

$$\widetilde{c}_i^n = \frac{\sum_j X_{ij}^n \left(p_j^n + tm_{ij}^n \right)}{\sum_j X_{ij}^n}$$

Avec

X_{ij}^n quantité de production de n demandée en I et produit en j,

p_j^n prix de n dans la zone de production j,

tm_{ij}^n coût monétaire du transport d'une unité de n de la zone de production j vers la zone de consommation i

g) Calcul des désutilités de consommation

La désutilité de consommer un input n dans la zone i est la moyenne logarithmique des désutilités utilisées dans la distribution de la production entre les zones.

$$U_i^n = -\frac{\ln Pg^n}{\beta^n} (\min_j U_{ij}^n)^{\theta^n}$$

L'expression est multipliée par la désutilité minimale car dans le calcul de la distribution TRANUS utilise une utilité échelonnée.

Pg est défini par :

$$Pg^n = \sum_{j=1}^{z} G_j \prod_{h=1}^{j-1} (1 - G_h)$$

Où le terme G_j est l'élément exponentiel dans le numérateur de la probabilité que la production demandée en i se localise en j :

$$G_j = \exp\left(-\beta \widetilde{U}_{ij}^n\right)$$

h) Vérification des capacités de production et ajustement des prix d'équilibre

La production d'un secteur dans une zone peut être limitée à la capacité minimum et/ou maximum de production. Si la production assignée à une zone se trouve en dessous des limites établies, le prix est égal aux coûts de production augmentés de la valeur ajoutée. Si la production est au-dessus du maximum ou au-dessous du minimum, alors le prix est déterminé par un équilibre offre-demande. À la fin de chaque itération, le modèle vérifie les restrictions (capacité de production) et

ajuste les prix en conséquence : le prix est augmenté si la restriction maximum est dépassée, et réduit si la restriction minimum est dépassée. Ces variations de prix affectent la distribution de la production dans les itérations suivantes, jusqu'à ce qu'un équilibre soit atteint.

i) Convergence

A chaque itération la convergence pour les prix et la production est évaluée. Toutes les deux sont calculées pour chaque zone et chaque secteur comme la variation en pourcentage par rapport à l'itération précédente. Ces indicateurs sont calculés séparément pour chaque secteur, et adoptent la valeur de la plus mauvaise zone.

$$Cp_j^{n,\tau} = \max_j \left| \frac{p_j^{n,\tau} - p_j^{n,\tau-1}}{p_j^{n,\tau-1}} \right|$$

$$CX_j^{n,\tau} = \max_j \left| \frac{X_j^{n,\tau} - X_j^{n,\tau-1}}{X_j^{n,\tau-1}} \right|$$

Où $Cp_j^{n,\tau}$ est l'indicateur de convergence pour les prix, et $CX_j^{n,\tau}$ est l'indicateur de convergence pour les productions.

Le modèle arrête le processus itératif quand les deux indicateurs de convergence sont plus petits que des critères de convergence pré-spécifiés, ou quand un nombre maximum d'itération est atteint.

3) L'interface entre les modules d'occupation des sols et de transport

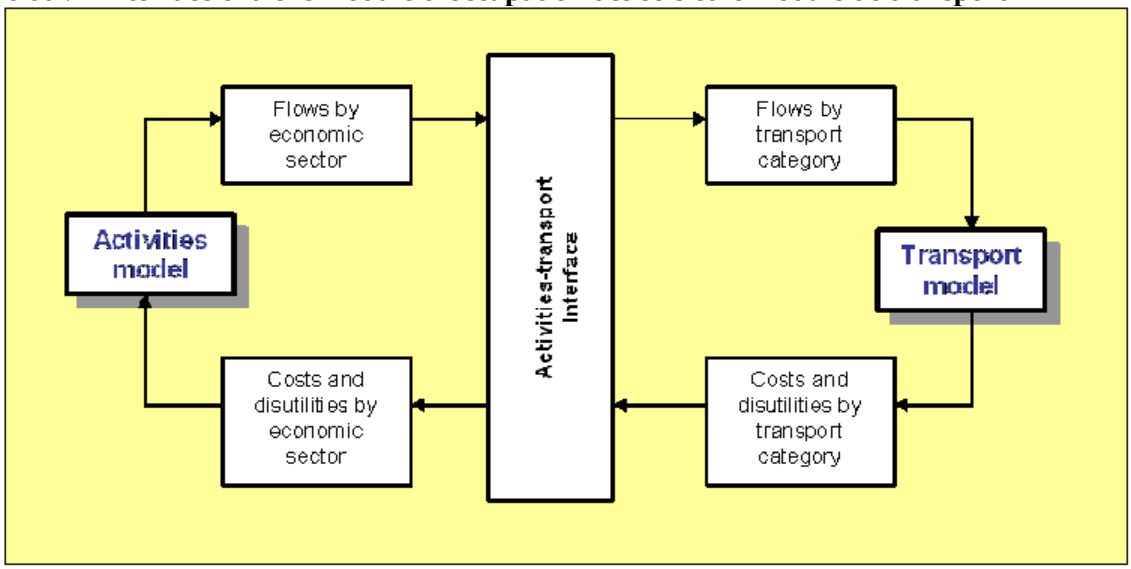
Le module d'occupation des sols produit un ensemble de matrices des flux économiques par secteur. Ces flux sont convertis en demande de transport par le module de transport. A l'inverse, le module de transport calcule des coûts de déplacement et des désutilités par catégories de transports, qui sont ensuite intégrés dans les calculs effectués par le module d'occupation des sols.

Le but de l'interface « activités vers transport » et « transport vers activités » est d'exécuter les transformations préalables nécessaires :

- Exprimer les matrices des flux économiques calculées par le module d'occupation des sols en matrices définies par catégories de transport, et inversement.
- Convertir les unités de temps : les secteurs économiques se réfèrent généralement à des quantités exprimées annuellement ou mensuellement alors que le secteur des transports travaillent par jour ou par heure.
- Convertir les quantités exprimées en valeur en quantités exprimées en volume, et inversement.
- Corriger la direction des flux : le module d'occupation des sols génère des flux économiques de la zone de consommation vers la zone de production, en suivant la direction de l'achat. Les mouvements des biens ou des personnes peuvent être inverses.

Le résultat est un ensemble de matrices des flux par catégories de transport. L'interface réalise les transformations suivantes :

Graphe 60 : Interface entre le module d'occupation des sols et le module de transport



Source : www.modelistica.com

Ces transformations sont représentées dans une seule équation :

$$F_{ij}^{s} = \sum_{n} \left(X_{ij}^{n} \frac{vol^{ns} pc^{ns}}{tiem^{ns}} + X_{ji}^{n} \frac{vol^{ns} cp^{ns}}{tiem^{ns}} \right)$$

Où

F_{ij}^{s} flux d'une catégorie de demande de transport s de l'origine I vers la destination j, en unité de transport.

X_{ij}^{n} production du secteur économique transportable n localisé en j et consommée en i

vol^{ns} facteur de conversion « valeur-vers-volume » pour le flux économique n faisant partie de la catégorie de transport s

$tiem^{ns}$ facteur de conversion des unités « temps » pour le flux économique n faisant partie de la catégorie de transport s

cp^{ns} proportion du flux économique qui se déplace dans la direction consommation → production

pc^{ns} proportion du flux économique qui se déplace dans la direction production → consommation.

La somme est effectuée sur tous les flux économiques n faisant partie de la catégorie de transport s.

Nous notons que les termes cp^{ns} et pc^{ns} représentent à la fois la proportion selon laquelle chaque secteur économique contribue à une catégorie de transport et la direction du flux.

4) Les calculs dans le modèle de transport

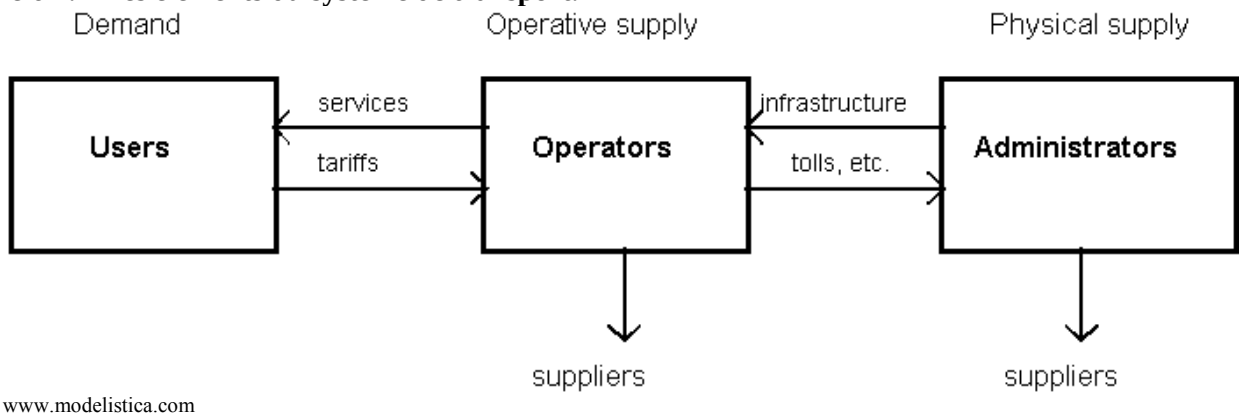
Le but principal du modèle de transport est d'estimer la demande de déplacement et de l'assigner à l'offre de transport, de telle façon qu'un équilibre soit atteint.

Le module d'occupation des sols estime un ensemble de matrices de flux économiques par secteur. L'interface transforme ces matrices en flux par catégories de transport. Le module de transport

prend ces flux comme des inputs et estime le nombre de déplacements. Ces déplacements sont assignés à l'offre de transport, représentée par les modes et les infrastructures de transport. Les coûts des déplacements et les désutilités résultant d'un équilibre offre/demande sont alors introduits dans le module d'occupation des sols pour simuler une période de temps suivante.

Les deux éléments principaux du modèle de transport sont l'offre et la demande. La demande est constituée des usagers et des marchandises. Du côté de l'offre, le modèle distingue l'offre physique (les infrastructures de transport) et l'offre opérationnelle. Un administrateur est responsable de l'offre physique. L'offre opérationnelle est représentée par les organismes privés ou publics qui font rouler les véhicules, perçoivent le prix des billets et payent les frais d'exploitation et les taxes aux administrateurs. Le transport privé est un cas spécial dans lequel l'utilisateur est en même temps l'opérateur. Il est également courant que les opérateurs des chemins de fer soient administrateurs de leur propre infrastructure. Cependant, le modèle de transport les considère toujours en tant qu'entités séparées pour des raisons de comptabilité.

Graphe 61 : Les éléments du système de transport.



Source : www.modelistica.com

a) La demande de transport

Les utilisateurs sont classés par des catégories de transport ; ceci permet de séparer le traitement des passagers et du fret. Les passagers sont classés par groupe de revenu et objet du déplacement. A chaque catégorie de personnes est associée une disponibilité d'accès à une voiture, ce qui limite le choix entre les modes publics et privés de transport.

De chaque option de voyage, les utilisateurs perçoivent une désutilité, qui inclut le coût monétaire du déplacement, la valeur du temps de voyage et du temps d'attente, et des éléments subjectifs (confort, fiabilité, sûreté, etc.).

b) L'offre de transport

i) L'offre opérationnelle

L'offre de transport est organisée en trois niveaux hiérarchiques :

- Les modes de transports : fret, public et privé.
- Les opérateurs : ils fournissent un service caractérisé par différentes caractéristiques (type de véhicule, tarif, consommation d'énergie, etc.)
- Les routes : séquence particulière de liens du réseau de transport que l'opérateur suit (ligne de bus, ligne de métro, etc.)

Les utilisateurs peuvent librement changer d'opérateur du moment que les deux opérateurs appartiennent au même mode ; les utilisateurs subissent alors des coûts de transfert et d'attente.

ii) L'offre physique

L'offre physique de transport est représentée par le réseau de transport défini comme un ensemble de liens à sens unique et de noeuds.

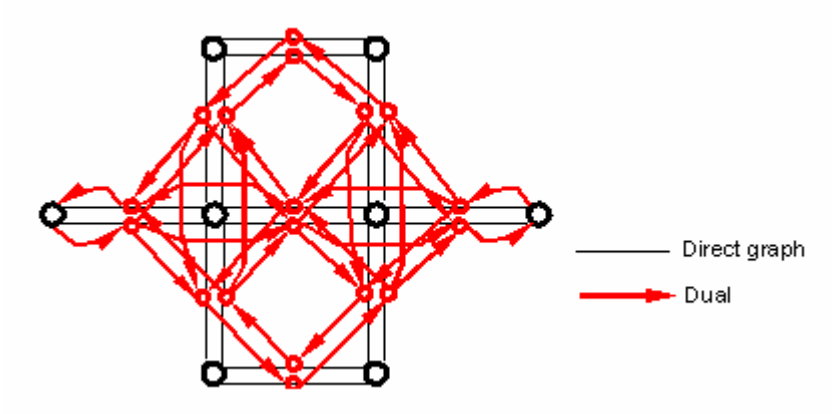
Les noeuds représentent les jonctions de route, les points auxquels les caractéristiques d'une route peuvent changer. Les centroïds sont des nœuds particuliers : ils représentent les zones, et pour le modèle de transport tous les voyages commencent ou finissent aux centroïds. Chaque centroïd doit être relié à un ou plusieurs nœuds du réseau.

Les liens peuvent représenter des sections de rue, des routes, des routes rurales, des chemins de fer, des voies aériennes, des voies d'eau, etc. Les liens ont des caractéristiques spécifiques, telles que la longueur, la capacité, la vitesse, etc. Certaines de ces caractéristiques sont spécifiques à un lien (longueur, capacité), mais d'autres sont définies génériquement, et à cette fin des types de lien sont définis. Tous les liens du même type partagent des caractéristiques communes (vitesse, coût d'utilisation, coût d'entretien, etc). Les types de lien définissent également quels opérateurs peuvent les emprunter.

Le modèle de transport simule le réseau de transport comme un « graphique dual ». L'objectif est de simplifier la prise en compte des sens interdits et des transferts modaux dans les calculs effectués par le module transport.

Dans beaucoup d'autres algorithmes, les noeuds représentent de vraies intersections de rues et les liens représentent des sections de route. Avec ces méthodes, la prise en compte des sens interdits oblige à introduire beaucoup de liens et de nœuds fictifs ; ce qui alourdit considérablement les informations nécessaires, le temps de calcul et l'étape d'affectation de la demande de mobilité sur le réseau. La méthode du « graphique dual » proposée dans TRANUS consiste à inverser la représentation : les sommets du graphique représentent des sections de route et les liens représentent les raccordements autorisés. Ainsi les liens interdits ne sont pas représentés. De plus cette méthode permet de définir des liens comprenant les coûts d'un transfert modal ; ce qui évite d'introduire un second réseau explicitant les intermodalité. Le réseau est codé par l'utilisateur de manière traditionnelle et une fois les calculs exécutés, le modèle traduit les résultats sous la forme classique (un lien représente à nouveau une rue, un nœud représente une intersection). Cette méthode ne présente donc aucune difficulté supplémentaire pour le modélisateur.

Graphe 62 : Graphique dual créé par TRANUS



Source : www.modelistica.com

iii) La structure des coûts

Le modèle de transport fait une distinction entre trois types de coûts :

- Les coûts pour l'usager. Ils incluent les composants monétaires et non-monétaires, et sont également appelés les coûts généralisés. Ils sont comptabilisés par déplacement. Deux types de tarifs sont spécifiés selon que le tarif est dépendant (fret) ou indépendant (transport public) des frais d'exploitation. Dans le cas des voitures privées, l'utilisateur et l'opérateur sont la même personne, de sorte que le tarif correspond aux frais d'exploitation.

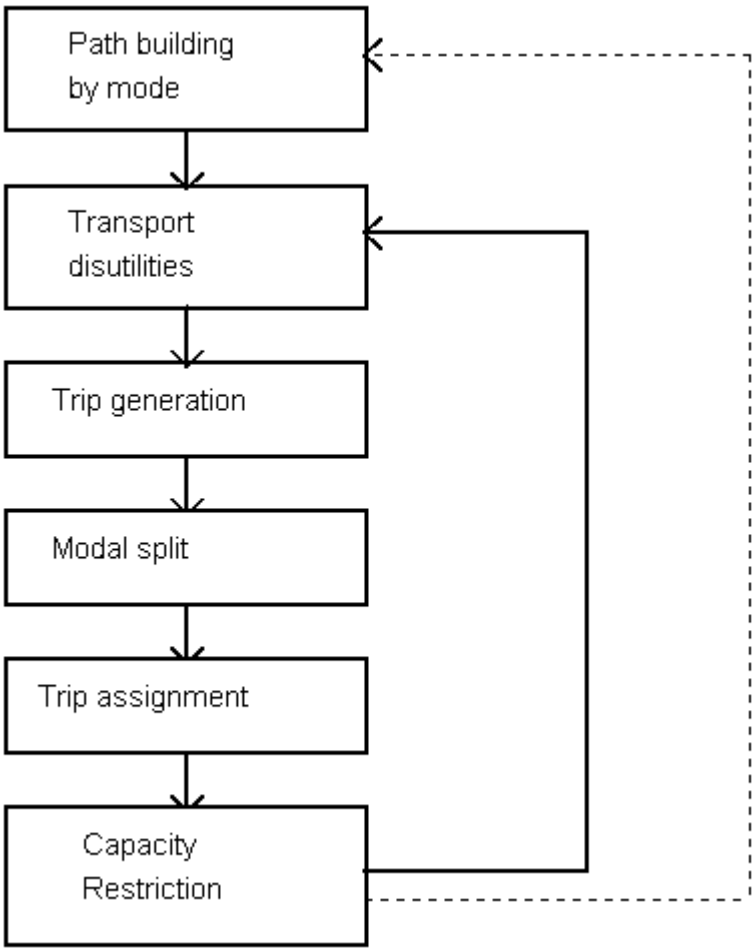
- Les frais d'exploitation. Ils sont strictement monétaires et sont exprimés par unité de véhicule. Les frais d'exploitation incluent un élément fixe (par voyage effectué), un élément prenant en compte la distance (pneus, pièces de rechange, entretien, huile, essence, etc), un élément dépendant du temps

(salaire des conducteurs, remboursement du capital, etc.), et les charges (stationnement, taxe, péage, etc.).

- Les coûts de maintenance. Les administrateurs payent des coûts de maintenance fixes et marginaux par unité de distance. Les coûts fixes incluent l'entretien courant en supposant qu'aucun véhicule n'emploie l'infrastructure. Les coûts marginaux représentent les coûts d'entretien attribuables à chaque véhicule additionnel voyageant le long du lien par unité de distance.

Les coûts pour l'usager et les frais d'exploitation sont pris en compte dans l'estimation de la génération des déplacements et leurs affectations sur le réseau. Les coûts de maintenance des infrastructures ne sont pris en considération que lors des évaluations de projet de construction d'une infrastructure nouvelle.

Graphe 63 : Séquence de calcul du module de transport



Source : www.modelistica.com

iv) La construction des chemins possibles

L'objectif de cette première procédure du module transport est de déterminer l'ensemble des options pour se déplacer d'une origine à une destination par mode de transport. Un chemin n'est pas simplement une séquence de liens, mais une séquence de combinaisons « liens/opérateurs ». Il peut y avoir deux chemins avec des liens physiques identiques, mais avec des opérateurs différents.

Durant la recherche des chemins possibles, le module calcule le coût généralisé pour chaque chemin, accumulant les éléments suivants pour chaque combinaison liens/opérateurs qui forme une partie d'un déplacement : les coûts relatif au temps, les coûts relatifs à la distance et les coûts de transfert.

$$c_{ijp}^{ks} = \sum_{m=1}^{z} RT_m^s + RD_m^s + TR_{m-1,m}^s$$

Où

c_{ijp}^{ks} coût généralisé du chemin p de i vers j avec le mode k pour la catégorie s*;*

RT_m^s coût relatif au temps dans la combinaison m(l,o) pour la catégorie s; l est le lien, o est l'opérateur.

RD_m^s coût relatif à la distance dans la combinaison m(l,o) pour la catégorie s

$TR_{m-1,m}^s$ coût de transfert, c'est à dire le coût du transfert d'une combinaison m-1 vers m.

Le coût relatif au temps inclut deux éléments principaux :

$$RT_m^s = tv_m\left(tt_o + \frac{ct_o tc_o}{to_o}\right)pc_o^s + tv_m\left(vv^s\, pt_m\, pg_o\, pp_o^s\right)$$

Où

RT_m^s coût relatif au temps de la combinaison lien/opérateur m perçu par le passager s;

tv_m temps de trajet de l'opérateur o sur le lien l, fonction de la longueur du lien et de la vitesse de l'opérateur;

tt_o tarif relatif au temps que fait payer l'opérateur o*;*

ct_o coût d'opération relatif au temps pour l'opérateur o;

tc_o proportion du coût d'opération que l'opérateur fait payer à l'usager;

to_o taux d'occupation moyen d'un véhicule de l'opérateur o;

pc_o^s proportion du tarif payée par l'usager s à l'opérateur o;

vv^s valeur du temps de déplacement pour la catégorie s;

pt_m facteur de pénalisation associé au type de lien de la combinaison *m(l,o);*

pg_o facteur de pénalisation associé à l'opérateur o;

pp_o^s facteur de pénalisation associé à la catégorie s.

Le coût relatif à la distance s'écrit :

$$RD_m^s = d_l\left(td_o + \frac{cd_m tc_o}{to_o}\right)pc_o^s,\ l,o \in m$$

Avec

RD_m^s coût relatif à la distance pour la combinaison m et la catégorie s.

d_l distance du lien l;

td_o tarif relatif à la distance que fait payer l'opérateur o;

cd_m coût d'opération relatif à la distance pour l'opérateur o;

tc_o proportion du coût d'opération que l'opérateur fait payer à l'usager;

to_o taux d'occupation moyen d'un véhicule de l'opérateur o;

pc_o^s proportion du tarif payée par l'usager s à l'opérateur o;

Le coût de transfert se calcule selon la formule suivante :

$$TR_m^s = \left(tf_o + \frac{cf_o tc_o}{to_o} \right) pc_o^s + te_m ve^s \quad , o \in m$$

Où

TR_m^s coût de transfert pour la catégorie s utilisant l'opérateur o sur le lien l.

tf_o tarif pour monter dans le véhicule de l'opérateur o;

cf_o coût d'opération fixe de l'opérateur o;

tc_o proportion du coût d'opération que l'opérateur fait payer à l'usager;

to_o taux d'occupation moyen d'un véhicule de l'opérateur o;

pc_o^s proportion du tarif payée par l'usager s à l'opérateur o;

te_m temps d'attente d'un véhicule de l'opérateur o sur le lien l;

ve^s valeur du temps d'attente pour la catégorie s.

Le module transport recherche ainsi un ensemble de chemins raisonnables et distincts. Le principe ici est que les utilisateurs considéreront plusieurs options de voyage. Le terme « raisonnable » indique que l'ensemble des chemins résultants de la recherche doit être ceux de moindre coût généralisé, supposant que les utilisateurs sont économiquement raisonnables.

La méthode inclut également une procédure pour contrôler l'indépendance des options. Cette méthode s'appelle le « contrôle de recouvrement », et résout le problème de l'indépendance des alternatives non-pertinentes lié aux modèles logit multinomial. La méthode du « contrôle de recouvrement » fonctionne par itération : le module recherche le chemin ayant le coût généralisé le plus faible puis le stocke. Les liens composant ce chemin sont pénalisés par un « facteur de recouvrement » s'additionnant dans le calcul du coût généralisé ; le module recommence itérativement cette opération jusqu'à ce que le chemin ayant le coût généralisé minimal soit identique à un des chemins déjà stockés.

Au final les chemins retenus sont ceux ayant les coûts généralisés et le taux de recouvrement avec d'autres chemins les plus faibles.

v) Le calcul des désutilités

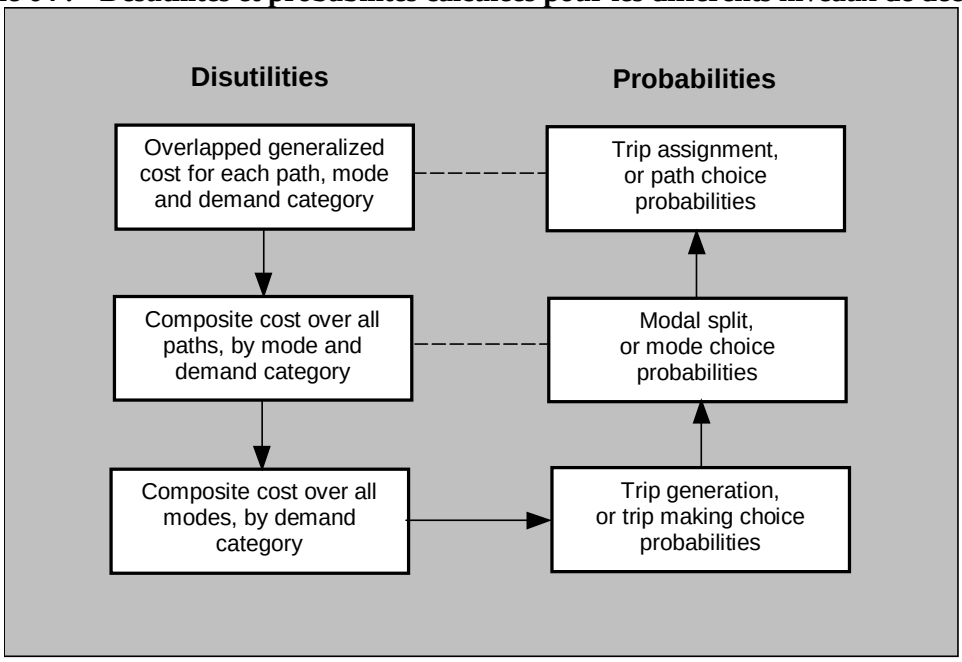
Les désutilités du transport sont une mesure de l'accessibilité qui influence à la fois les décisions de localisation et les choix de transport.

Les coûts monétaires de transport font partie des désutilités, et sont employés directement pour calculer des coûts de production dans le modèle de localisation des activités. Le modèle de transport garde donc séparément des traces des désutilités et des coûts monétaires.

Comme le montre le graphe 64, le module de transport considère trois niveaux de décisions pour lesquels les désutilités sont calculées et constituent la base pour le calcul des probabilités : le choix du chemin, le choix du mode de transport et le choix de se déplacer.

Les flèches de le graphe 64 indiquent la séquence des calculs. Le module commence par calculer la désutilité au niveau du choix du chemin. Elle correspond aux coûts généralisés de chaque chemin dont nous avons présenté le calcul précédemment. Les coûts généralisés sont alors agrégés entre chemins pour former le coût composite par catégorie et par mode, ce qui constitue l'utilité au niveau du choix modal. Enfin les coûts composites sont agrégés entre modes pour former le coût composite général pour chaque catégorie de demande de transport, ce qui constitue l'utilité au niveau du choix de se déplacer.

Graphe 64 : Désutilités et probabilités calculées pour les différents niveaux de décision.



Source : www.modelistica.com

vi) La génération des déplacements

L'objectif de cette étape est de calculer le nombre de déplacements dérivés d'un flux économique calculé par le module d'occupation des sols et transformé en flux de transport par l'interface. Le nombre de déplacements produits par une catégorie s pour une paire Origine-Destination pendant une période de temps particulière est fonction de la désutilité composite. Le module représente la génération des déplacements comme suit :

$$T_{ij}^{s} = F_{ij}^{s}\left[v_{\min}^{s} + \left(v_{\max}^{s} - v_{\max-\min}^{s}\right)\exp\left(-\eta^{s}\tilde{c}_{ij}^{s}\right)\right]$$

Où

F_{ij}^{s} flux par catégorie de transport s de i vers j.

$v_{\min}^{s}$ nombre minimal de déplacements par unité de flux produit par la catégorie s, quelque soit la valeur de l'utilité composite.

$v_{\max}^{s}$ nombre maximal de déplacements par unité de flux produit par la catégorie s, quand l'utilité composite tend vers zéro.

η^{s} élasticité de demande de transport de la catégorie s par rapport à l'utilité composite.

A chaque itération, la désutilité augmente en raison de la congestion. En conséquence, le nombre de déplacements diminue, selon l'élasticité de chaque catégorie de demande de transport.

Quand le système converge vers un équilibre, la différence entre le nombre de déplacements estimé dans la première et la dernière itération s'appelle la demande réprimée.

vii) Le partage modal

L'étape de partage modal estime le nombre de déplacements de la catégorie s qui choisissent le mode k à partir du nombre de déplacements pour la catégorie en question (calculé dans l'étape précédente) et du calcul des probabilités modales suivant :

$$T_{ij}^{ks} = T_{ij}^{s} P_{ij}^{ks} \left[\varphi^{s} + \left(1 - \varphi^{s}\right) B^{k} \right] \qquad B^{k} = \begin{Bmatrix} 1 \text{ if } k \text{ is public} \\ 0 \text{ if } k \text{ is not public} \end{Bmatrix}$$

Où

φ^{s} taux d'accès à une voiture de la catégorie s.

viii) L'affectation des déplacements

Les déplacements par catégorie et par mode sont assignés aux différents chemins grâce à un modèle logit multinomial où les probabilités de choix de chemin sont appliquées au nombre de déplacement par mode calculé lors de l'étape du partage modal.

ix) La « restriction liée à la capacité »

L'objectif de l'étape de « restriction liée à la capacité » est d'ajuster le temps de trajet et les temps d'attente en fonction des rapports entre la demande et la capacité. Ces ajustements sont effectués à la fin de chaque itération, une fois que toutes les demandes ont été assignées à l'offre.

La vitesse de déplacement de chaque opérateur sur chaque lien est ajustée à la fin de chaque itération en fonction du niveau de la congestion, selon la capacité du lien. Pour les liens ayant une capacité non définie, les vitesses demeurent constantes, égale au flux libre initial.

Le module calcule alors les embouteillages sur chaque lien et ajuste les temps d'attente.

Ces derniers calculs terminent la première itération. Une deuxième itération commence avec les nouvelles estimations des frais d'exploitation, des coûts généralisés et des désutilités modifiées par les ajustements des temps de trajet et d'attente ; ceux-ci affectent la génération des déplacements, le partage modal et leur affectation, entraînant un nouvel ensemble d'ajustements lors de la restriction de capacité.

Une fois que toutes les itérations nécessaires ont été effectuées, les coûts et les désutilités résultants affecteront la localisation des activités et leurs interactions lors d'une nouvelle période de temps.

x) La convergence

La convergence du module de transport est mesurée sur tous les liens comme la différence en pourcentage entre l'itération s'achevant et la précédente pour deux variables : la vitesse et le trafic. Le processus itératif cesse quand ces deux différences sont toutes les deux au-dessous des critères de convergence prédéfinis. Le modèle retient le plus mauvais des liens.

B - *Présentation de la Signature Energétique des Transports Urbains (SETU)*

La Signature Energétique des Transports Urbains (SETU) convertit les sorties du modèle TRANUS en termes de consommations énergétiques et d'émissions de CO_2 liées. Elle s'appuie sur l'approche « ASIF »[132] de l'IEA. Cette méthode propose d'analyser les émissions polluantes (C02

[132] Citée en introduction du premier chapitre de la thèse.

compris) des transports comme le produit de quatre ensemble de paramètres (Schipper, Lilliu, 1999 ; Schipper, Fulton, 2001 ; Schipper, 2002) :

A, (« *Acitivity* ») : l'activité totale de déplacement (passenger-km ou tonne-km) ;

S, (« *Structure* ») : la répartition modale des déplacements (% par mode de transport) ;

I, (« *energy Intensity* ») : l'intensité énergétique de chaque mode de transport (carburant/passenger-km ou carburant/tonne-km) ;

F, (« *« carbon » factor effect for the mix of Fuels used* ») : les émissions de polluants par quantité de combustible consommé pour chaque type de combustible utilisé dans chaque mode de transport (émissions de polluants par quantité de combustible consommé) ;

La « SETU » est alimentée pour les composantes activité (A) et répartition modale (S) par le module transport et pour les composantes liées à la technologie employée (I et F) par un fichier « technologie de transport urbain » constitué pour la ville d'application.

Le calcul des consommations énergétiques tient compte des conditions locales de trafic, de qualité des carburants et d'état des véhicules.

Nous exposons dans le chapitre 6 son élaboration ad hoc pour notre cas d'étude Bangalore, Inde.

La Signature Energétique des Transports Urbains présente de façon agrégée et désagrégée les consommations énergétiques liées aux transports urbains et les émissions de gaz à effet de serre induites. Ces résultats peuvent être désagrégés selon les modes de transport, les groupes de passagers, les destinations, origines ou couples origine-destination, les motifs de déplacement, etc.

V - Conclusions

Ce cinquième chapitre a analysé les outils de simulation des dynamiques urbaines existants et a justifié le choix de TRANUS comme le modèle adapté à notre approche - développée dans les deux premières parties de la thèse - de la problématique des consommations énergétiques et émissions de CO_2 engendrées par les transports dans les villes du Sud et de la capacité des technologies à en infléchir les trajectoires de croissance.

La revue critique de la littérature effectuée dans la première partie de la thèse nous a conduit à soutenir trois thèses : 1) il est nécessaire de centrer l'analyse des consommations énergétiques et émissions de CO_2 liées aux transport urbains sur le fonctionnement du couple « transport – usage des sols » qui est au cœur des dynamiques de structuration de l'espace urbain et par là détermine les niveaux de consommation d'énergie et d'émission de CO_2 engendrées par les déplacements urbains ; 2) la tâche prioritaire des politiques urbaines est d'anticiper et d'accompagner les dynamiques de marché qui structurent l'espace urbain ; 3) pour placer les transports dans les villes du Sud sur des trajectoires environnementalement soutenables, la planification urbaine se doit de « prendre en tenaille » les consommations énergétiques liées aux déplacements urbains par des politiques transport et urbanisme intégrées et complémentaires.

Les analyses menées dans la deuxième partie de la thèse sur le fonctionnement du couple « transport – usage des sols » et l'articulation entre ces deux systèmes et les marchés foncier et immobilier nous ont notamment renseigné sur la complexité de la chaîne de causalité selon laquelle l'évolution de ce couple se traduit en termes de structuration urbaine. Les paramètres intervenant dans les relations fonctionnelles au sein du couple « transport – usage des sols » sont multiples, interdépendants et co-déterminés.

Ainsi les résultats des analyses développées dans les deux premières parties de la thèse concluent sur la nécessité de disposer d'un outil de simulation des dynamiques de structuration

urbaine, basé sur une compréhension approfondie des mécanismes de choix de localisations et de transport, pour tester les thèses avancées en première partie concernant les leviers d'action pertinents pour infléchir significativement les trajectoires de consommations énergétiques liées aux transports urbains.

Cette thèse n'étant pas tournée vers le développement d'un nouvel outil de modélisation urbaine, nous avons cherché un modèle existant, opérationnel, reconnu et satisfaisant certaines exigences issues des analyses menées dans les deux premières parties de la thèse.

Nous avons donc dans un premier temps défini trois séries de critères pour le choix de l'outil de simulation. Ces critères sont le résultat du croisement entre les critères d'évaluation de l'opérationnalité d'un modèle quantitatif proposés par Bonnafous (Bonnafous, 1972) et les variables clefs des relations fonctionnelles au sein du couple « transport – usage des sols » mises en exergue dans les deux premières parties de la thèse.

La première série de critères concerne la cohérence à la fois interne au modèle et par rapport à son objectif. Cette exigence de cohérence se traduit dans le cadre de notre projet de thèse par la recherche d'un modèle de prospective, transparent, capable de simuler les interactions entre le système de transport et le système d'usage des sols et d'évaluer les effets des politiques alternatives de transport, d'urbanisme et économiques.

La deuxième série de critères porte sur la pertinence du modèle, c'est-à-dire la conformité entre sa structure logico-mathématique et les réalités de l'objet. Cette exigence de pertinence signifie dans le cadre de notre programme de recherche que l'outil de simulation doit prendre en compte les différents sous-systèmes urbains intervenant dans la co-évolution structurante du couple « transport – usage des sols » et les temporalités d'évolution différentes de ces sous-systèmes urbains. Il doit d'autre part permettre d'intégrer le regard macro-géographique sur les spécificités et les forces d'attraction, de diffusion et de répulsion entre les différentes zones du territoire urbain. Enfin cette exigence de pertinence nous conduit à tenir compte de l'historicité des applications des différents outils de simulation, preuve de leur validité et fiabilité.

La troisième série de critères concerne la mesurabilité du modèle, c'est-à-dire la possibilité de proposer une estimation pour toutes les grandeurs intervenant dans le modèle. Elle dépend donc d'une part de la gourmandise, en qualité et quantité de données, du modèle. Notre projet étant de travailler sur Bangalore, Inde, ce critère est essentiel pour notre recherche. Nous ajoutons dans ce critère de mesurabilité des exigences propres au caractère doctoral de cette recherche et à l'ignorance totale de ces modèles en début de thèse qui ont obligé l'auteur à tenir compte des paramètres de prise en main des modèles : le coût du logiciel, la possibilité de le modifier, le niveau de puissance nécessaire de l'ordinateur, sa convivialité, le temps de calibration et de simulation.

Nous avons ensuite effectué une revue critique de la littérature présentant les différents modèles urbains existants à la recherche d'un modèle qui soit cohérent avec notre objet et notre objectif de recherche et offre le meilleur équilibre entre la pertinence théorique, la mesurabilité et l'applicabilité.

A partir d'une étude comparative des trois traditions théoriques majeures de modélisation des interactions entre les usages des sols et les transports dans les aires urbaines – les modèles de la géographie et la sociologie, les modèles de la micro-économie et les modèles « des ingénieurs et planificateurs » - nous décidons de nous orienter vers une des quatre familles de modèles appartenant à la dernière traditions théoriques : les modèles interactifs « transport – usage des sols ». En effet la famille des modèles interactifs « transport – usage des sols » est la seule famille de modèle urbain permettant à la fois de prendre en compte le long terme, de simuler les interactions entre le système de transport et le système d'usage des sols, d'intégrer le regard macro-géographique et d'évaluer les effets des politiques alternatives de transport, d'urbanisme et économiques.

Il existe une trentaine de modèles interactifs « transport – usage des sols ». Aussi, dans un second temps, nous affinons notre sélection de l'outil de simulation adapté à notre projet de recherche. Le modèle TRANUS se dégage progressivement de la comparaison des différents modèles interactifs en fonction des critères de choix définis préalablement.

TRANUS est un modèle interactif de prévision quasi-dynamique spatial-économique. Il s'appuie sur des bases théoriques solides. La technique de simulation du marché foncier est empruntée à la micro-économie : les fonctions d'enchères développées par Alonso. La modélisation du système

d'activité urbaine s'appuie sur la théorie de la base de Hoyt et les matrices Entrées / Sorties proposées par Leontieff et spatialisées par de la Barra, le concepteur de TRANUS. Ces matrices Entrées / Sorties spatialisées garantissent la cohérence et la pertinence de l'interface entre le module de transport et le module d'occupation des sols. Ensuite, TRANUS offre la possibilité de mesurer les effets des différentes politiques définissant la « tenaille » présentée dans le deuxième chapitre de la thèse. Enfin, TRANUS est un des deux modèles interactifs les plus largement appliqués dans le monde, et ses applications concernent autant des villes du Nord que des villes du Sud. S'il reste exigeant en qualité et quantité des données, et difficile à prendre en main, TRANUS est un modèle mobilisable dans le cadre de notre programme de thèse du fait de la convivialité de son interface utilisateur, de son accessibilité et de la disponibilité de son concepteur.

TRANUS apparaît donc comme l'outil de modélisation des dynamiques urbaines présentant le meilleur équilibre entre les exigences de cohérence, de pertinence et de mesurabilité proposées par Bonnafous et reformulées pour le cadre de notre projet de recherche.

Chapitre 6 : Application de TRANUS-SETU à Bangalore, Inde

L'objectif de ce sixième chapitre est de tester la capacité de la « tenaille de politiques de transport et d'urbanisme intégrées et complémentaires », proposée dans le deuxième chapitre de la thèse, à infléchir les trajectoires de consommations énergétiques et émissions de CO_2 liées aux transports urbains.

Nous avons sélectionné et adapté dans le cinquième chapitre de la thèse un outil de simulation des dynamiques de structuration urbaine, TRANUS-SETU, nous permettant de mesurer l'efficacité énergétique de cette « tenaille ». Comme chaque ville est spécifique, nous appuyons notre recherche sur un exemple urbain emblématique.

Nous choisissons d'appliquer TRANUS-SETU au cas de Bangalore, capitale du Karnataka, Inde, pour différentes raisons.

Tout d'abord, parce que la situation de Bangalore est caractéristique des villes du Sud :

La population de Bangalore a triplé en 30 ans. Passant de 4,13 à 5,68 millions d'habitants entre 1991 et 2001, elle enregistre la plus forte progression des grandes villes indiennes après Delhi. Elle est maintenant la cinquième de l'Union. Malgré un léger tassement de son taux de croissance (1981-1991 : 3,52% ; 1991-2001 : 3,25%), la capitale du Karnataka devrait atteindre le cap des 10 millions d'habitants en 2020. (SCE-CREOCEAN, 2004).

L'étalement urbain de Bangalore est encore plus impressionnant : l'espace urbanisé croît de 5,4% par an (2.200 hectares). En 2005, la ville occupe une superficie de 540 km^2, contre 284 en 1990 et 202 en 1983, époque où, par comparaison, la croissance spatiale restait contrôlée.

Entre 1991 et 2005, le nombre des véhicules enregistrés à Bangalore s'est accru de plus de 200% (passant de 680.000 à 2.200.000), soit une augmentation annuelle trois fois supérieure à celle de la population (10,8% contre 3,25%). Aujourd'hui, Bangalore partage la première place avec Delhi pour le taux de motorisation (32 véhicules pour 100 personnes). Néanmoins, même si les embouteillages s'y multiplient aux heures de pointe, la circulation reste assez fluide. Mais ce privilège risque de ne pas durer, si l'on en juge par la corrélation entre le taux de motorisation, l'élévation du niveau de vie de la moitié de la population et les dynamiques spatiales. On peut craindre un engorgement général avant cinq ans, accéléré par la dispersion des lotissements en périphérie, qui incite à l'utilisation de la voiture individuelle. Or la congestion du trafic, l'augmentation des temps de déplacement, la restriction de la mobilité et, pour finir, la perte d'une certaine qualité de vie, peuvent avoir un impact direct sur le dynamisme économique de la ville.

Ensuite, parce que le cas de Bangalore en lui-même est passionnant. Bangalore connait depuis une quinzaine d'années de profondes mutations urbanistiques, économiques et sociales liées au boom des nouvelles Technologies de l'Information (TI). Elle est aujourd'hui réputée internationalement comme la « Silicone Valley » indienne (Le Monde, *Boomtown Bangalore*, 25/04/2007) ; la « cité jardin » de l'après indépendance fait place à la ville des TI. Mais ces mutations et leur rapidité mettent à mal les capacités de gestion urbaine : ses infrastructures suivent difficilement son développement économique, les signes d'un engorgement de la ville sont flagrants. La soutenabilité du développement urbain, et notamment dans sa composante environnementale, est particulièrement inquiétante. Bangalore affiche clairement son ambition de devenir l'un des pôles mondiaux des TI. Cela la conduit à envisager une véritable refondation urbaine, en l'occurrence mégapolitaine (Haeringer, 2002), qui pourrait cependant être contrecarrée par un réflexe de résilience. Le premier objectif est déjà atteint : personne ne conteste à Bangalore sa place éminente sur le marché international des TI. Elle est d'ores et déjà une destination majeure des entreprises qui se délocalisent, mais elle subit la concurrence croissante d'autres villes indiennes et asiatiques. On voit même, depuis peu, de grandes entreprises nées à Bangalore déplacer une partie de leur activité vers Chennai, Hyderabad, Mumbai, ou vers des

villes chinoises. La seconde ambition est encore en débat. La structure dense et radio-concentrique de la ville, confrontée à une urbanisation galopante, risque de se bloquer et d'aboutir à une situation ingérable. Mais elle peut également être mise à profit pour soutenir un développement économique ambitieux. L'un des défis à relever est l'intégration de l'Inde traditionnelle et de l'Inde moderne. L'attractivité de Bangalore repose sur de multiples éléments dont la combinaison relève d'une alchimie savante.

En 2006, les autorités de Bangalore ont avalisé le nouveau plan d'urbanisme « Bangalore 2020 ». De vifs débats ont eu lieu entre les différentes parties prenantes, aussi bien sur les priorités ou les grandes orientations structurelles que sur les moyens pour agir. Ces débats ne sont toujours pas tranchés et les principes directeurs du plan d'urbanisme sont déjà profondément remis en question.

Enfin, SCE-CREOCEAN, un bureau d'étude français, a travaillé pendant 2 ans sous mandat des autorités municipales sur l'élaboration du plan d'urbanisme « Bangalore 2020 ». Un partenariat avec SCE-CREOCEAN, nous a permis de profiter des prodigieux efforts de collecte de données et de compréhension réalisés pendant ces deux années.

Ainsi Bangalore apparaît comme un cas d'étude exemplaire, répondant aux différentes exigences de notre investigation. La ville connaît une croissance démographique massive et rapide. En l'absence de contrainte géographique, l'étalement urbain est d'autant plus inquiétant qu'il renforce la motorisation déjà explosive. Les autorités peinent à encadrer ces dynamiques spontanées, faute de moyens financiers, institutionnels et humains.

La première section présente le cas d'étude : Bangalore, Inde.

La deuxième section décrit les différentes étapes de l'application de TRANUS et de SETU.

La troisième partie discute et présente les scenarii de politiques urbaines que nous choisissons de tester.

La quatrième section analyse les résultats des simulations produites par TRANUS-SETU.

I - Présentation du cas d'étude : Bangalore, Inde

A - *Le boom économique*

Si les dynamiques d'agglomération ont connu un changement brutal durant les années 1990, marquées par le boom des activités liées aux Technologies de l'Information (TI), la réalité sur laquelle le planificateur doit composer ne correspond pas exactement à l'image idyllique d'une *Silicon Valley* indienne. Le secteur des technologies de l'information est devenu un moteur essentiel de la prospérité urbaine, mais il n'a pas pour autant bouleversé la répartition des emplois de la ville, ni amélioré les conditions de vie de l'ensemble de la population. La dynamique TI a sans doute fait mûrir la société urbaine, mais elle a participé aussi bien à l'explosion démographique qu'au creusement des inégalités. A côté du scintillement marketing de l'*IT city*, il serait prudent de mesurer les dangers de fragmentation que la révolution numérique fait courir à la société urbaine : les 20% les plus riches bénéficient de plus de la moitié des revenus de l'agglomération, alors que les 20% les plus pauvres n'en obtiennent que des miettes (3,8%) (SCE-CREOCEAN, 2005).

La croissance économique a été provoquée après l'indépendance et pendant près de quarante ans par un fort investissement public dans le domaine de la recherche civile, militaire et spatiale, puis à partir des années soixante par la création et l'implantation de plusieurs grandes entreprises publiques, notamment l'Indian Telephone Industries (ITI), l'Hindustan Aeronautics Limited (HAL), l'Hindustan Machine Tools (HMT), Bharat Electricals Limited (BEL). Le développement d'entreprises privées de textile et de confection (activités de vieille tradition), d'industries d'électricité, de machines outils (ingénierie), de sous-traitance automobile, alimentaires et chimiques a été complété au cours de la dernière décennie du 20ème siècle par les industries de haute technologie, électronique, informatique et télécommunication. Cette dernière évolution fait de Bangalore le « *hub* » des activités indiennes des TI (Technologies de l'Information) – « *Asian Silicone Valley* » - et donne de cette ville l'image d'un des points mondiaux de focalisation de la délocalisation des industries IT américaines et européennes. Néanmoins, si l'on examine les chiffres d'emplois (recensement 2001), on constate que sur un total d'actifs de 2,4 millions, seuls 690.000 environ sont employés par les entreprises industrielles du secteur organisé public et privé (dont 360.000 environ par les entreprises IT, soit 15% des actifs). A cela il convient d'ajouter environ 375.000 emplois publics de l'Etat et fédéraux (estimation SCE-CREOCEAN, 2005). Ainsi, le secteur non organisé emploierait de l'ordre de 1 million d'actifs de Bangalore, soit plus de 40% des emplois! Certains experts et auteurs donnent un pourcentage plus élevé de l'ordre de 75% (SCE-CREOCEAN, 2004).

Ces quelques chiffres nous conduisent à noter que si l'IT est important, il convient de le relativiser et surtout d'éviter l'effet « bulle » qu'il risquerait de produire si l'importance de son développement ultérieur venait déstabiliser les constituants de base (traditionnels) de l'économie de Bangalore et, en particulier, la diversité de ses activités industrielles et de service. La question du développement des activités TI est souvent mal posée. Un retour sur les facteurs qui ont permis leur essor serait salutaire. L'économie de Bangalore est en effet caractérisée par une bonne agrégation de ses divers secteurs. Certains secteurs sont plus visibles que d'autres et lui ont donné sa renommée nationale et internationale, mais tous forment un réseau d'interrelations fortes. L'accomplissement de l'ambition mégapolitaine de Bangalore passera sans doute par la recherche d'une gamme supplémentaire d'activités tertiaires supérieures, à fortes capacités d'investissement, moins volatiles que les TI et moins dépendantes de l'étranger. Mais il serait prudent d'équilibrer cette fuite en avant par un regard sur le développement local, et de fonder davantage l'analyse économique sur les composantes de l'offre que sur la demande extérieure. La qualité des facteurs de production, les synergies intersectorielles, les économies d'agglomération et d'urbanisation[133], ainsi que les capacités

[133] Les économistes identifient trois facteurs pour expliquer l'agglomération d'activités productives en un même lieu, la ville : les économies d'échelle, qui sont internes à l'entreprise ; les économies de

d'innovation, tous ces éléments du terrain local seraient ainsi vus comme les véritables paramètres du développement à long terme de l'aire métropolitaine. L'ambition mondialiste, trop focalisée, distord le diagnostic et risque de mettre en danger la cohésion socio-économique de la ville, une cohésion exceptionnelle qui n'est pas étrangère à l'essor d'aujourd'hui.

En réalité, durant les années 1960 et 1970, Bangalore a connu une extraordinaire croissance, «dans l'ombre», des petites industries et d'un secteur informel lié. Cette croissance a accompagné, profité et servi l'essor des grandes industries manufacturières et du secteur public (ITI, HAL, HMT, BEL, etc). Ces industries tout comme le secteur public ont offert un marché captif pour les produits des petites industries. Les dernières décennies ont été marquées par un changement graduel de ces relations, du fait d'une part de l'évolution des conglomérats industriels et d'autre part de la récente ouverture économique.

Au cours de la période 1996-97 à 2000-2001, la croissance globale des emplois aurait été de l'ordre de 0,5 million pour une augmentation d'environ 94.000 entreprises (dont 93.845 petites, la plupart non organisées). Cela représente une croissance moyenne de 120 à 150.000 emplois par an (SCE-CREOCEAN, 2004). Cette croissance est très forte et correspond en partie aux nombreuses délocalisations dont Bangalore a bénéficié au cours des dernières années. Celles-ci ont aussi entraîné une forte augmentation d'emplois induits dans des secteurs d'activités plus traditionnelles et notamment dans les services en tous genres.

Le plan d'urbanisme de 1995 se référait au chiffre d'emplois en 1991, soit 1,267 millions, pour prévoir qu'il atteindrait 1,798 millions en 2001 avec une prévision de la population totale de 5,8 M, puis 2,31 millions d'emplois en 2011 pour une population totale de 7 millions d'habitants et un taux d'emploi de 0,33. Ces prévisions d'emplois ont été largement dépassées si l'on en juge par les chiffres de 2001. Par contre la population totale a presque atteint le chiffre prévu. Ainsi, le taux d'emploi a fortement progressé pour atteindre, voire sensiblement dépasser, 40% en raison de l'accélération de la croissance des implantations d'activités à forte valeur ajoutée et à fort potentiel d'emplois qualifiés principalement à partir de la seconde moitié des années 90. La croissance des emplois s'est manifestement accélérée au cours de la seconde partie de la décennie 1990 pour atteindre un maximum de 150.000 emplois par an, la moyenne étant de 120.000 (SCE-CREOCEAN, 2004).

Nous n'avons pas pu recueillir des données fiables et en quantité suffisante pour évaluer les valeurs ajoutées des différentes activités et pour apprécier en ces termes le poids économique de la ville. Le caractère totalement ou partiellement informel de certaines activités fausse complètement l'appréciation que l'on peut avoir en terme de valeur ajoutée.

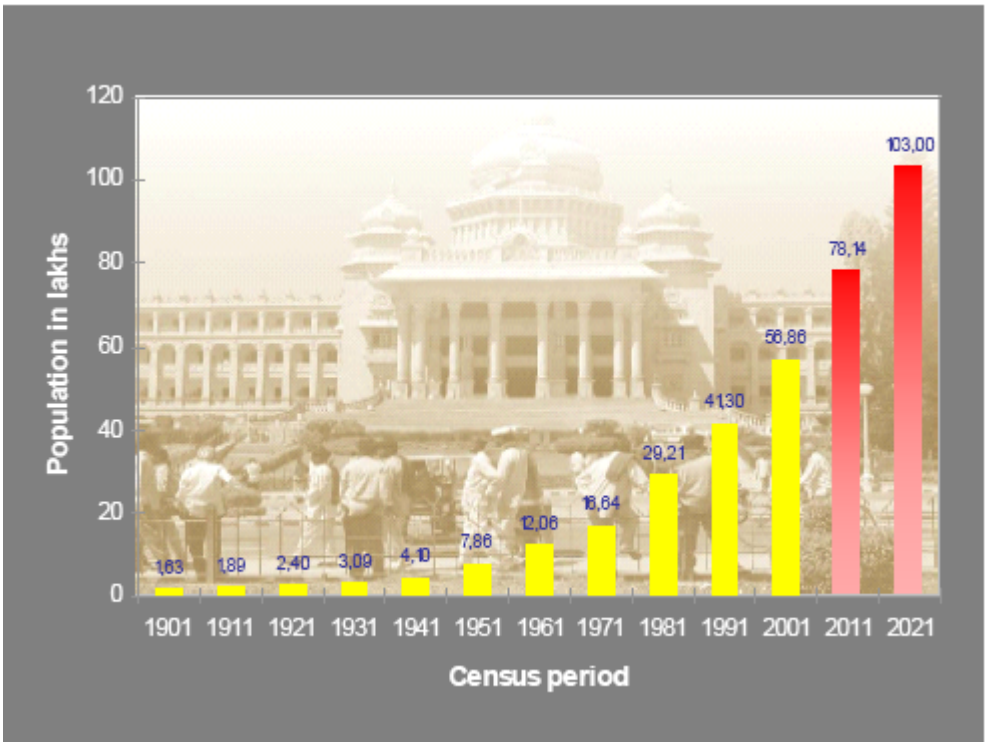
B - *Le boom démographique*

Bangalore, capitale du Karnataka, dont la population a triplé depuis 30 ans est maintenant la cinquième plus grande ville indienne. La population de Bangalore est passée de 4,13 millions d'habitants en 1991 à 5,68 million en 2001, soit une progression de 155.000 habitants par an pendant 10 ans. Depuis 1991, Bangalore a connu le plus fort taux de croissance démographique des villes indiennes (après Delhi) de plus de 5 millions d'habitants. Même avec un faible ralentissement de ce taux de croissance annuel (1981-91 : 3,52% ; 1991-2001 : 3,25%), Bangalore est aujourd'hui placée dans la perspective d'atteindre 10 millions d'habitants en 2020. Bangalore accueille aujourd'hui 185.000 habitants supplémentaires chaque année (SCE-CREOCEAN, 2004).

---

localisation, qui sont externes à l'entreprise, mais internes au secteur industriel concerné ; les économies d'urbanisation, qui sont externes à l'entreprise et au secteur industriel, et qui découlent de la présence d'infrastructures publiques et d'une interaction forte entre des activités multiples (Camagni, 1996).

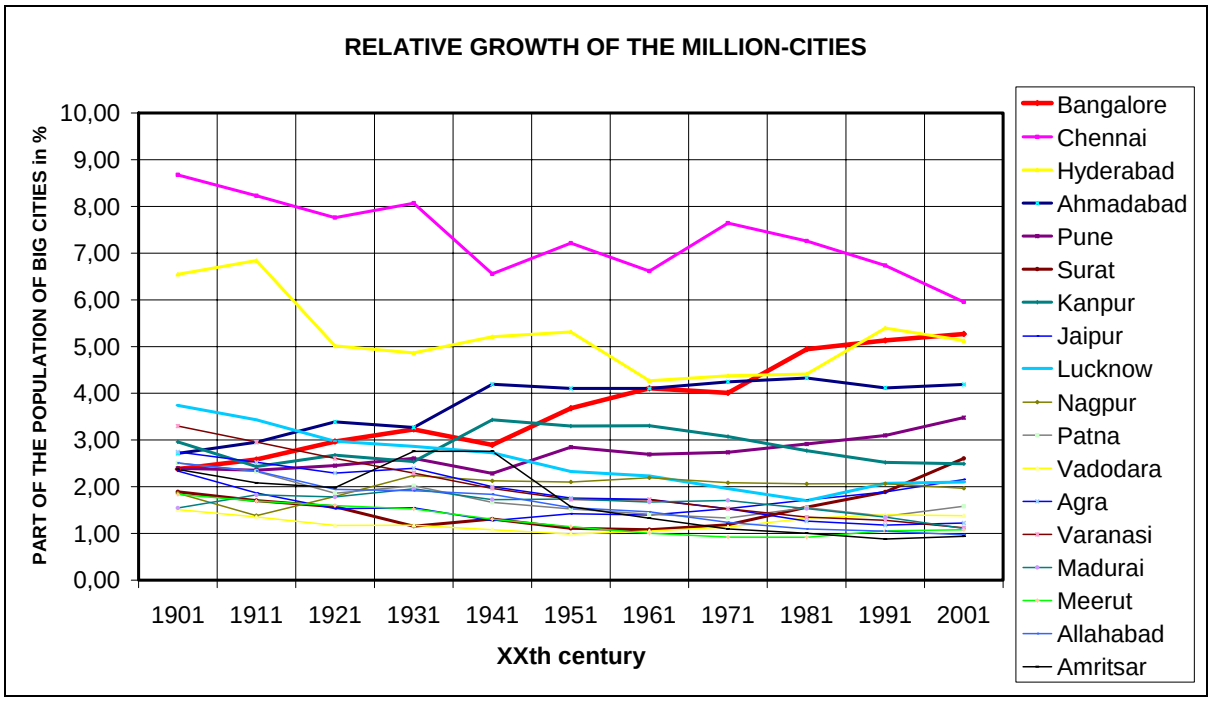
Graphe 65 : Croissance démographique de Bangalore 1901 – 2021



Source : SCE-CREOCEAN, 2005.

Comparée aux autres grandes villes indiennes (à l'exception de Delhi, Mumbai et Kolkata), la trajectoire démographique sur le long terme de Bangalore est originale : alors qu'elle était dans les villes les moins peuplées au début du 20ème siècle, Bangalore se place aujourd'hui juste derrière Chennai dont la population au contraire diminue depuis 30 ans. Les courbes de croissance démographique de ces deux villes sont symétriquement opposées. (SCE-CREOCEAN, 2004).

Graphe 66 : Croissance démographique des villes millionnaires indiennes 1901 – 2001



Source : SCE-CREOCEAN, 2004

La courbe de croissance démographique de Bangalore indique quatre phases significatives : l'époque coloniale avec la présence anglaise et l'établissement des bases militaires, des services administratifs et de l'aire « *Cantonment* » dans la ville à partir de 1870 ; les années de 1940 à 1970, avec l'indépendance nationale et la deuxième guerre mondiale, époque d'industrialisation de la ville et de la création des grands conglomérats industriels publics ; la décennie 70 avec le boom démographique lié au développement des industries de soies et du textile ; puis au début des années 90, le boom des industries liées au Technologies de l'Information. (SCE-CREOCEAN, 2004 ; 2005).

C - *Le boom spatial*

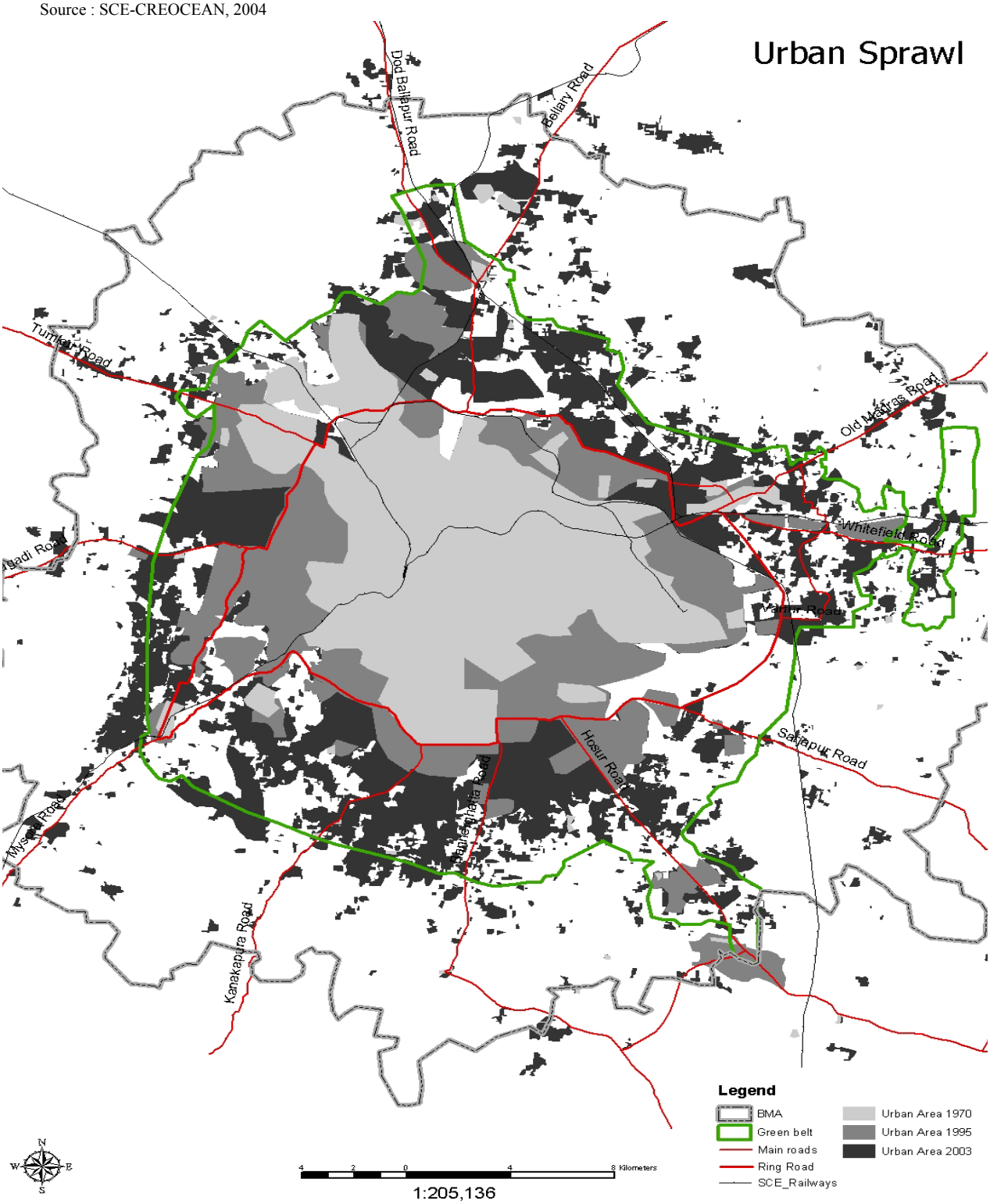
Bangalore a connu ces dix dernières années une étalement urbain sans précédent : en 2005 la ville occupe une superficie de 540 km^2, ce qui par rapport à l'aire urbaine de 1990 (284 km^2) représente une croissance géographique de 5,4% par an. En l'absence de limites naturelles, la ville consomme 2200 hectares de terres supplémentaires chaque année. (SCE-CREOCEAN, 2004 ; 2005).

Cette étalement urbain est en rupture avec les tendances passées caractérisant une croissance géographique modérée : entre 1983 et 1990, l'aire urbaine était passée de 202 à 280 km^2.

Ce fort taux de croissance géographique actuel est à mettre en parallèle avec les 2,6% de croissance annuelle pour le réseau routier et les 8,6% de croissance annuelle de la population de véhicule tout mode confondu. (SCE-CREOCEAN, 2004 ; 2005).

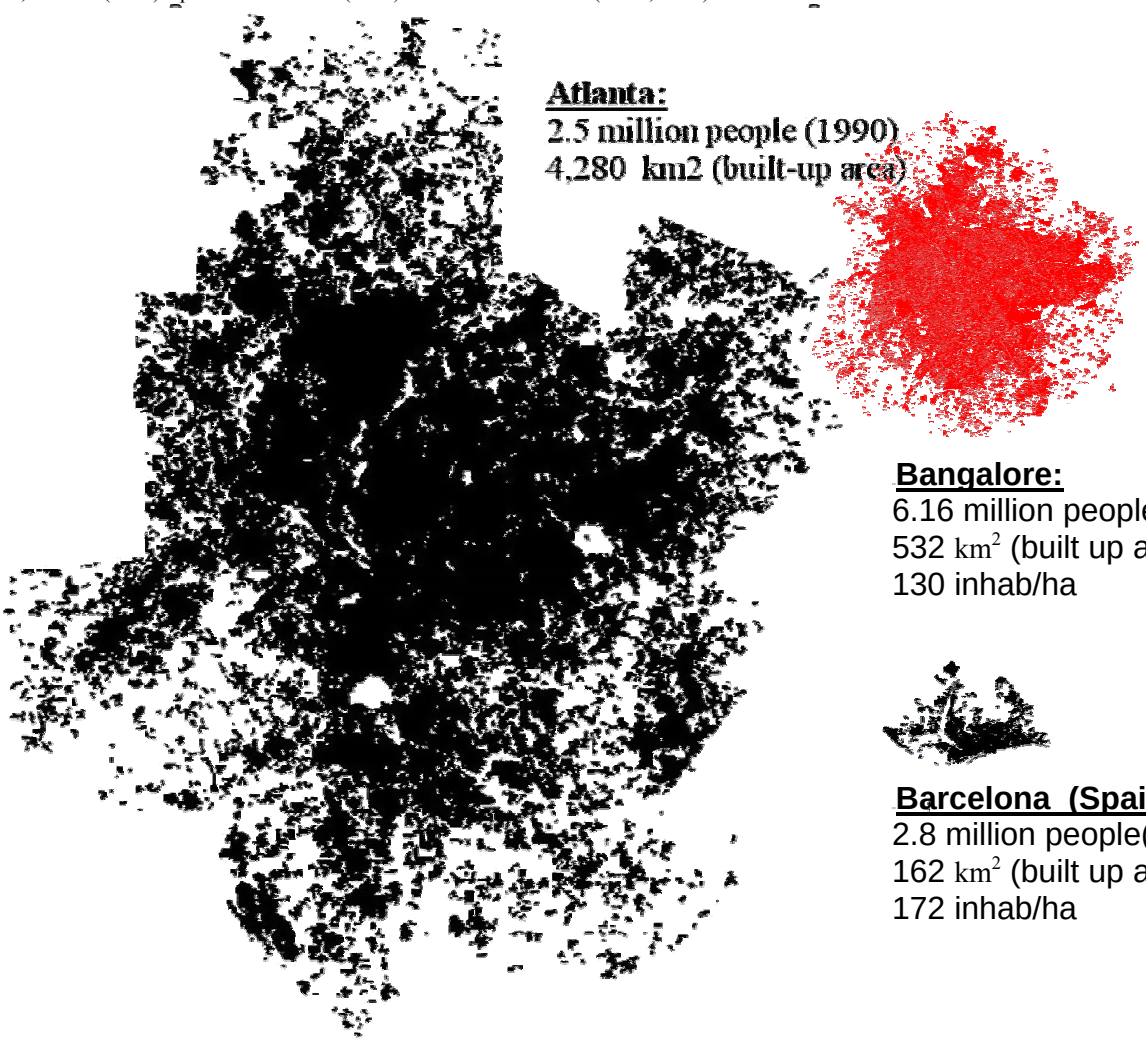
Si ce taux de croissance géographique se maintient durant les 15 prochaines années, l'agglomération urbaine s'étirera sur 200 km^2 supplémentaires, soit un peu mois que la moitié de sa superficie actuelle.

Carte 33 : Etalement urbain de Bangalore 1970 – 2003 :
Source : SCE-CREOCEAN, 2004



Carte 34 : « Tâche urbaine » de Bangalore, en comparaison de celle d'Atlanta et Barcelone

Source Giraud, Lefèvre (2006) à partie de : Bertaud (2001) et SCE-CREOCEAN (2004 ; 2005)



D - *Une distribution hétérogène des densités*

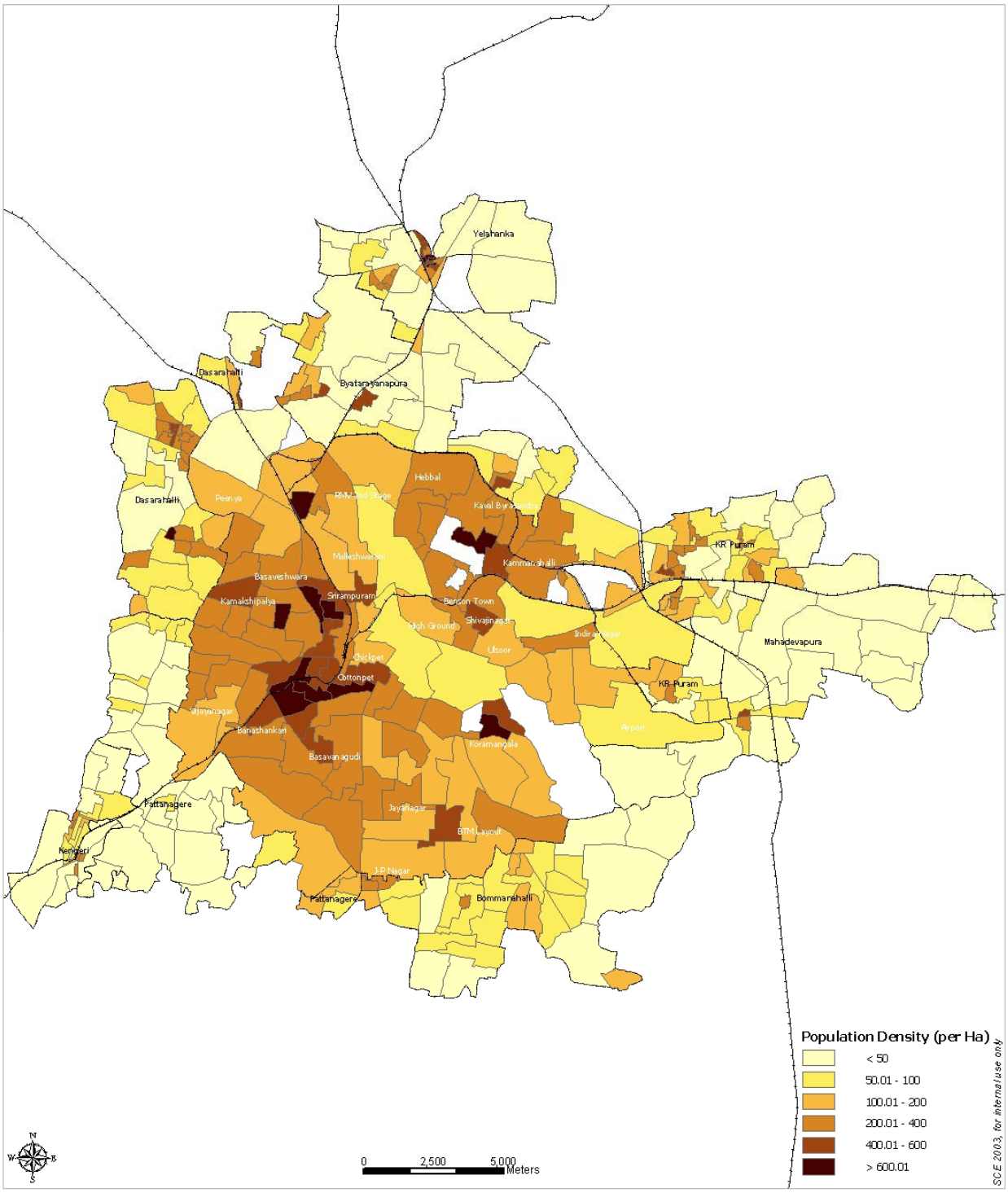
La densité brute de population est de 130 hab/ha, ce qui est relativement faible. Si nous rapportons ce chiffre à la surface résidentielle, la densité nette est de 300 hab/ha, soit une densité élevée qui s'explique par le fort taux d'occupation des zones résidentielles et la taille importante des sites non occupés au sein de la ville : plusieurs parcs (11,1 km^2, soit 1,9% de la superficie urbaine[134]) et étendues d'eau (0,9 km^2, soit 0,2% de la superficie urbaine), d'immenses terrains militaires (27,4 km^2, soit 4,8% de la superficie urbaine) et des zones laissées vacantes «(130 km^2, soit 22,9% de la superficie urbaine). (SCE-CREOCEAN, 2004)

A l'intérieur de la Bangalore City Corporation (à l'intérieur du Outer Ring Road), la densité brute s'élève à 214 hab/ha, une figure significativement plus forte due à une densification plus forte des zones urbanisées. Pourtant la densité de population n'a pas augmenté au sein de la Corporation entre 1991 et 2001, ce qui peut s'expliquer pas la diminution de la taille des ménages, la compétition entre le résidentiel et le commerce dans le centre ville et le transfert de la croissance démographique vers les périphéries.

La carte de la densité de population met en avant deux parties historiques de la ville (Old Petta à l'Ouest et Cantonment à l'Est) séparée par un arc Nord-Ouest/Sud-Est de densité très faible occupé par le secteur administratif, les grands parcs (Cubbon park, Golf Course) et les terrains militaires. Au sein de ces deux zones, on trouve des poches de très hautes densités : Cottonpet (620 hab.ha), Chickpet (560 hab/ha), Rajajinagar (440 hab/ha).

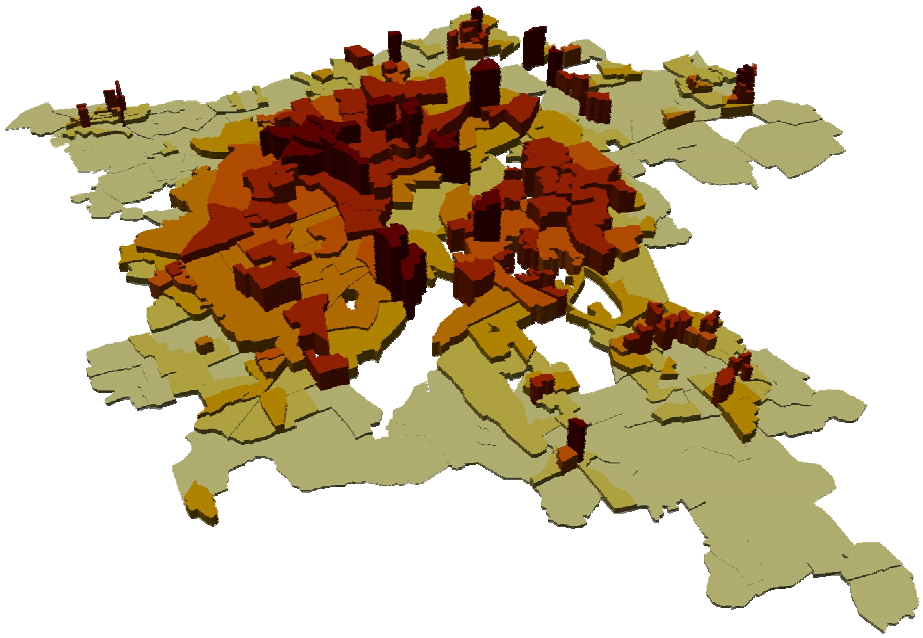
Enfin des densités supérieures à 800 hab/ha se rencontrent le long des axes routiers majeurs, notamment Tumkur road, Mysore Road et Magadi Road. Cette tendance à la densification le long des corridors se confirme en périphérie.

[134] Les pourcentages sont calculés par rapport au 568 km^2 de superficie urbaine (SCE-CREOCEAN, 2004 ; 2005).



Carte 35 : Distribution spatiale des densités à Bangalore en 2001
Source : SCE-CREOCEAN, 2004.

Carte 36 : Représentation 3-Dimensions de la répartition spatiale des densités à Bangalore
Source : SCE-CREOCEAN, 2004



E - *La morphologie de Bangalore*

La morphologie de Bangalore (cf carte 37) peut être lue comme le croisement de deux dynamiques d'organisation spatiale qui se superposent, l'une annulaire et l'autre radioconcentrique. La première relève d'une urbanisation aréolaire (par cercles concentriques), productrice des tissus denses de la ville antérieure, alors que la seconde traduit une expansion linéaire et divergente le long des principaux axes de transport.

1) L'organisation aréolaire

Du centre vers la périphérie, le plan d'urbanisme « Bangalore 2020 » proposé par SCE-CREOCEAN en 2006 distingue cinq auréoles autour d'un hyper-centre. Ces cinq couronnes sont liées aux différentes étapes du développement urbain de Bangalore.

a) Le cœur de la ville

Il est l'élément originel de la ville. En concentrant la majorité des emplois, des services commerciaux et administratifs, et donc des destinations des déplacements, il est la centralité dominante de l'agglomération. Mais une des principales originalités de Bangalore est la pluri-centralité de son cœur. Nous distinguons au sein de cet hyper-centre quatre sous-centres fonctionnels : Majestic, la plate-forme logistique constituée par les gares centrales ferroviaires et routières et la station centrale des bus urbains ; Petta, le centre historique commercial traditionnel ; Vidhana Soudha – High Court, le centre politique ; et Mahatma Gandhi Road et ses extensions vers Shantala Nagar et Vasant Nagar, le centre commercial moderne et financier. Il pourrait être qualifié de «Central Business District» si son développement n'était pas limité par le manque d'espace.

Ainsi l'hyper-centre de Bangalore est marqué par le contraste entre la force de son centre politique et la faiblesse de son centre économique. Ce dernier est orienté vers les activités de commerces traditionnels, comme le long de Brigade Road. Les activités de tertiaire supérieur ne se rencontrent que à l'extrême Est de M.G. Road et ne peuvent se développer faute d'espace. De fait le CBD tend à s'extérioriser du centre vers des zones plus privilégiées comme Indira Nagar ou le long de Sankey Road.

Un projet récurrent dans les plans d'urbanisme élaborés depuis 1960 est de ceinturer cet hyper-centre par un périphérique central (Core Ring Road) qui limiterait la circulation centrale au strict nécessaire. Ce projet n'a encore jamais vu le jour, essentiellement en raison de son coût politique et financier pour acheter le foncier, les immeubles résidentiels et commerciaux et les abattre. Etant donné la densité du bâti dans les zones centrales de Bangalore, la construction de ce périphérique central nécessite en effet la destruction d'un nombre important d'immeubles ; ce qui est sujet politiquement sensible en Inde.

b) La première couronne en mutation

Cette première couronne regroupe les espaces entourant le coeur et ceinturés par le périphérique intermédiaire partiellement construit et dont l'achèvement est de nouveau proposé dans le dernier plan d'urbanisme (Intermediate Ring Road). Elle présente des zones urbaines ayant des profils très différents. Certaines comme Maleshwaram, Richmond Town ou Vasanth Nagar sont en cours de valorisation : elles constituent des pépinières spontanées pour les activités liées aux technologies de l'information et concentrent des populations appartenant aux classes moyennes et riches. D'autres comme les anciens centres d'artisanat traditionnel et quartiers populaires de Benny Mills sont en voie de dégradation.

Toutes les zones de cette couronne connaissent de profondes et rapides mutations, aujourd'hui opposées selon leur héritage urbain, mais possèdent toutes un fort potentiel de développement urbain à long terme.

c) La deuxième couronne de densification et restauration

Il s'agit de la plus importante partie de la ville, avec tous les espaces bâtis au-delà du périphérique intermédiaire proposé dans le plan d'urbanisme présenté en 2006 par SCE-CREOCEAN. Le périphérique extérieur (Outer Ring Road) joue un rôle important ; il se situe en limite externe de la couronne au Nord et à l'Est, et à l'intérieur de la couronne au Sud et à l'ouest ; il est appelé à devenir rapidement l'axe structurant de toute la couronne.

C'est un territoire socialement contrasté où nous trouvons aussi bien les zones sous-développées que les quartiers de haut standing. Les problématiques sont donc différentes : les quartiers défavorisés tels que Deevarajeevanahalli nécessitent des investissements en service essentiel de base; les quartiers de classe moyenne et riche appèlent une densification là où la pression foncière est forte.

d) La troisième couronne du vide d'occupation

Il s'agit des 176 km^2 de lotissements viabilisés mais vides qui enserrent toute la ville (particulièrement au Sud-Est). Cet espace a tout simplement besoin d'être occupé, mais cela suppose qu'il soit équipé et réorganisé. Le plan d'urbanisme actuellement en discussion propose des mesures incitatives comme la création d'une taxe sur le foncier urbain non-bâti, applicable aux lots non-construits deux ans après l'achat du terrain. Le corridor Sud-est prévu pour les implantations TI futures se situe dans cette couronne mais a été heureusement en grande partie protégé de cette invasion.

e) La quatrième couronne d'extension future

Il s'agit de 100 km^2 situés entre la limite externe des «lotissements vides» et le futur périphérique extérieur (Peripheral Ring Road), surtout au Nord et à l'Est, et qui sont dans le plan d'urbanisme 2006 réservés pour les urbanisations après 2020.

f) La cinquième couronne de la ceinture verte

Elle se situe au-delà du Peripheral et est constituée de champs et forêts. Le plan d'urbanisme de SCE-CREOCEAN distinguent deux parties aux vocations différentes : au Sud et à l'Ouest, la ceinture verte doit être maintenue pour arrêter le déferlement des lotissements et protéger les espaces sensibles et stratégiques, notamment les sources et nappes phréatiques ; au Nord et à l'Est, moins stratégique environnementalement, la ceinture verte pourrait être ouverte à l'urbanisation selon les besoins de développement.

2) L'organisation radio-concentrique

A ce plan auréolaire se superpose une organisation urbaine radio-concentrique qui traverse les couronnes et unifie la ville. Elle comporte deux éléments étroitement associés, les grands axes concentriques de transport et les couloirs industriels et commerciaux qui se sont développés le long de ces axes.

Cette seconde organisation s'appuie sur la trame formée par les axes de communication : une étoile à cinq branches majeures[135], avec cinq lignes secondaires[136]. Ce système de communication est radial, tous ces axes convergent vers le cœur de la ville et les transversales sont peu développées.

Ces axes de transport ont entraîné le développement de grands couloirs d'activités traversant les couronnes. Cela est particulièrement visible dans la moitié sud-ouest de l'agglomération, de Tumkur

[135] Les cinq axes majeures sont Mysore Road, Madras Road, Bellary Road, Hosur Road et Tumkur Road.

[136] Les cinq axes secondaires sont Magadi Road, Kanakapura Road, Bannerghatta Road, Vartur Road et Whitefield Road.

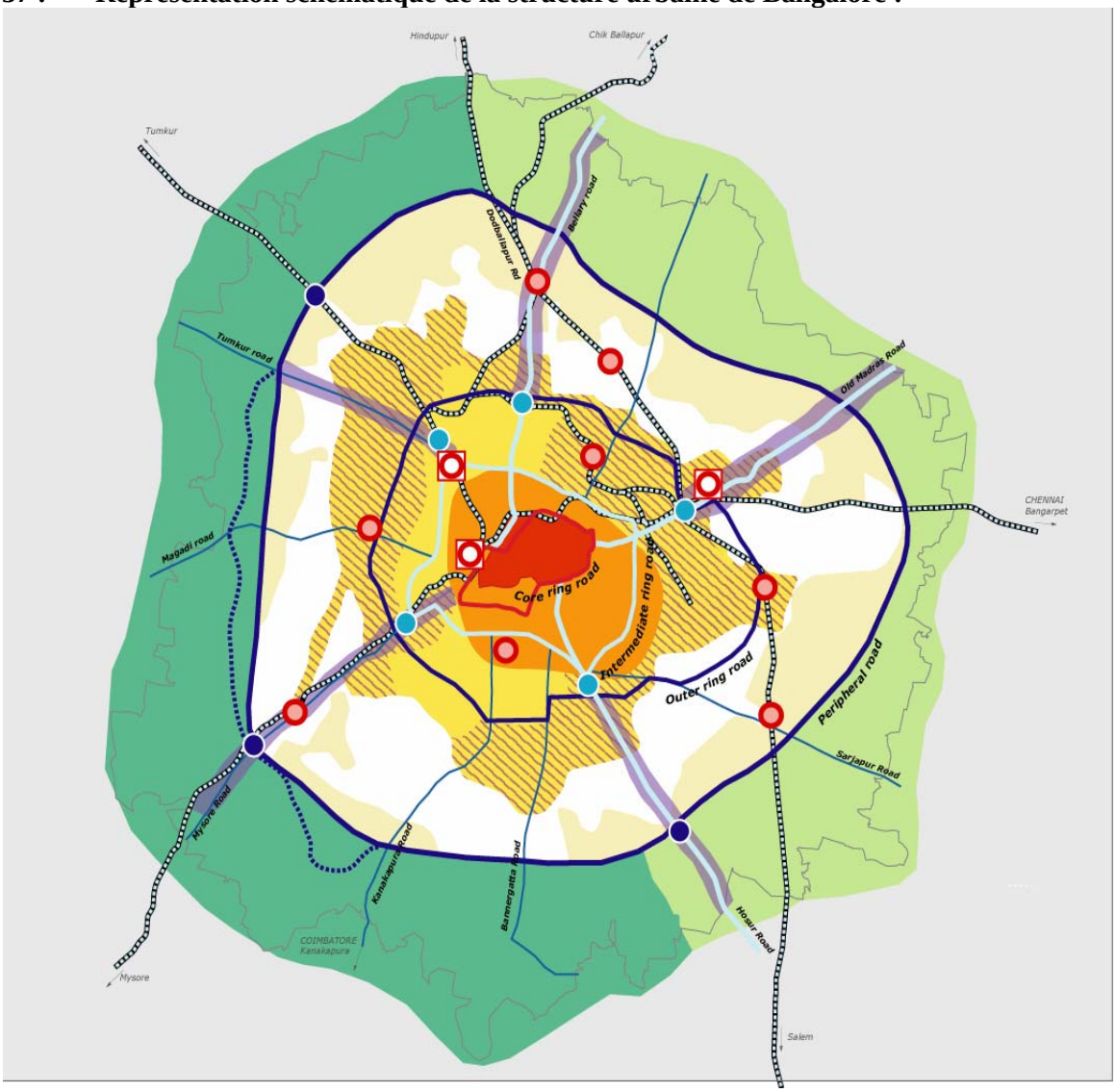
Road à Hosur Road en passant par Mysore Road et incluant les axes secondaires, Magadi Road, Kanakapura et Bannergatta Road.

3) Le croisement des deux organisations

Les points-clefs de l'agglomération, en dehors du cœur lui-même, se situent donc au croisement des deux structures. Il s'agit des carrefours entre les cinq axes radio-concentriques et les périphériques successifs, Intermediate, Outer et Peripherial. Compte tenu de la proximité entre l'Intermediate et l'Outer Ring Road sur les trois axes de Mysore, Hosur et Old Madras Road, les deux carrefours peuvent être confondus ; ce qui donne sept carrefours déterminants dans la zone urbaine, auxquels viendront s'ajouter les cinq carrefours du Peripheral, soit douze au total.

D'autre part un contraste morphologique apparaît entre deux parties de la ville : le Sud-ouest est principalement organisé en couloirs alors que au Nord-est les activités s'inscrivent au contraire dans le schéma auréolaire, avec les industries traditionnelles dans la deuxième couronne de densification / restauration et les nouveaux espaces industriels (TI et logistique) dans la troisième couronne située entre l'Outer Ring Road et le Peripherial Ring Road.

Carte 37 : Représentation schématique de la structure urbaine de Bangalore :



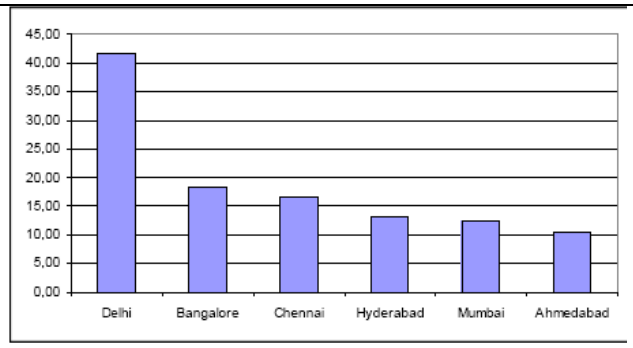
Source : SCE-CREOCEAN, 2005

F - *Le boom de la motorisation*

Entre 1991 et 2005, le nombre de véhicules enregistré à Bangalore est passé de 680.000 à 2.207.000, ce qui constitue une croissance de plus de 200%. Durant la même période, alors que la population augmentait de 3,25% par an, le rythme de croissance annuelle des véhicules motorisés était de 10,8%, soit plus de trois fois supérieur. (SCE-CREOCEAN, 2005).

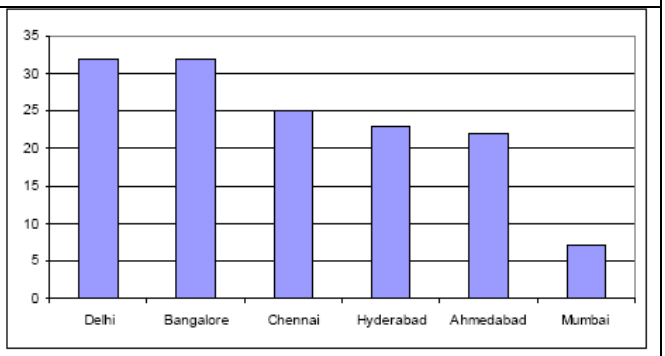
Aujourd'hui, Bangalore connaît le taux de croissance des véhicules le plus important des villes indiennes de plus de 1 million d'habitants. Elle prend la seconde place (derrière Delhi) pour le nombre de véhicules et partage la première place avec Delhi pour le taux de motorisation (32 véhicule pour 100 personnes).

Graphe 67 : Nombre de véhicules dans les villes millionnaires indiennes en 2004



Source : National Urban Transport Policy and Websites

Graphe 68 : Nombre de véhicules pour 100 habitants dans les villes millionnaires indiennes en 2004



Source : National Urban Transport Policy and Websites

Source : SCE-CREOCEAN, 2005

Cette croissance concerne tous les modes de transport :

- Les deux roues qui représentent aujourd'hui la majorité des véhicules (74%) et dont le taux de croissance a été de 9,5% par an. Cette croissance spectaculaire peut être attribuée au progrès économique et à l'amélioration du niveau de vie, à la relative accessibilité financière de ce mode de transport (renforcé par un système de prêt très incitatif), à la préférence de la population des 20-30 ans pour ce mode de transport mais aussi à la congestion du trafic où seul la moto permet un gain de temps significatif.
- La voiture avec un taux de croissance de 10,5% par an. Même si le nombre de voitures reste limité et ne concerne aujourd'hui que deux ménages sur dix, la progression de 600 voitures enregistrées par jour est impressionnante.
- Le bus avec un taux de croissance de 11,2% par an.
- L'auto-rickshaw et le taxi avec un taux de croissance de 11% par an.

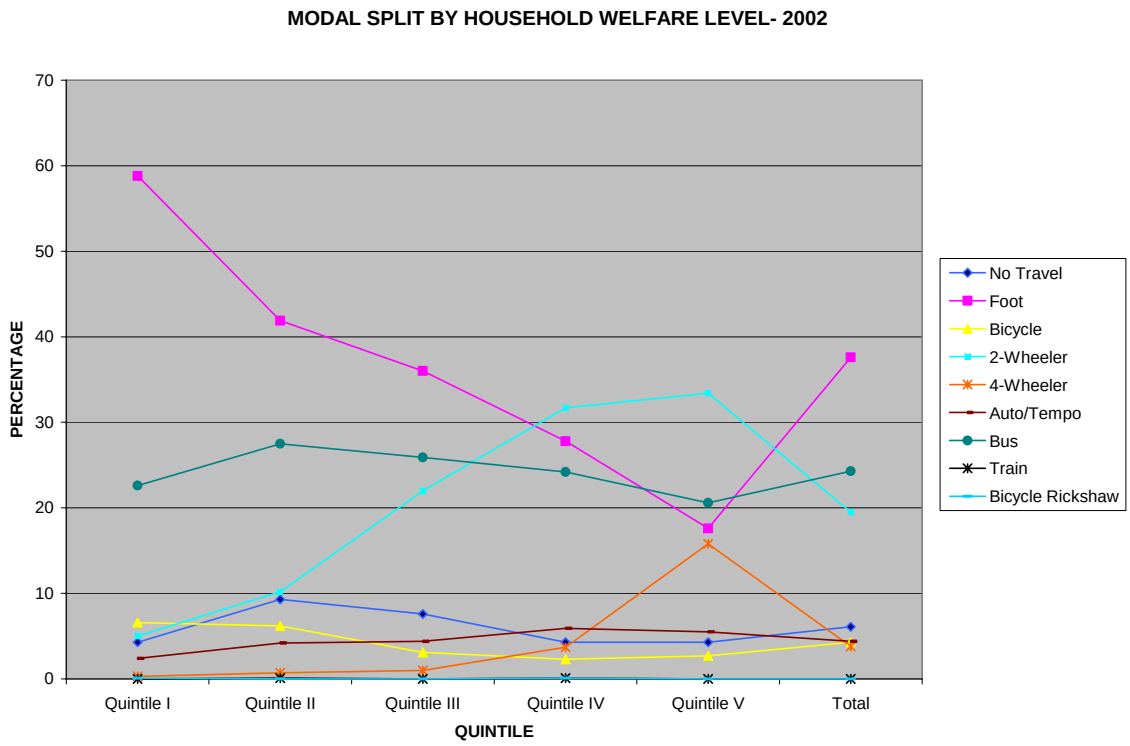
Si ce rythme de croissance est maintenu, le nombre de véhicules motorisés à Bangalore sera de 3.700.000 en 2010 !

La répartition modale des transports à Bangalore montre que plus de 41% des habitants utilisent le bus comme principal moyen de transport[137] Ce chiffre peut être attribué aux performances de la BMTC, considérée comme une des autorités de transport public la plus performante d'Asie. Afin de satisfaire la demande, beaucoup d'efforts ont été réalisés par la BMTC : entre 1998 et 2005, plus 1000 bus ont été acquis pour atteindre une flotte de 3900 bus. Sur ces 3900, 630 bus sont loués à des entreprises privées. Aujourd'hui, la BMTC transporte chaque jour 315.000 passagers ce qui représentent 55.000 voyages (SCE-CREOCEAN, 2005). Un peu moins du tiers des habitants (30,4%)

[137] C'est-à-dire plus que dans des villes comparables comme Ahmadabad ou Chennai

se déplacent en deux-roues alors que seulement 5% utilisent la voiture. Le reste se répartissant entre deux modes de transport non-motorisé, la marche à pied (16%) et le vélo (1,7%). (RITES, 2003)

Graphe 69 : Répartition modale des déplacements à Bangalore en fonction du quintile de revenu. 2002

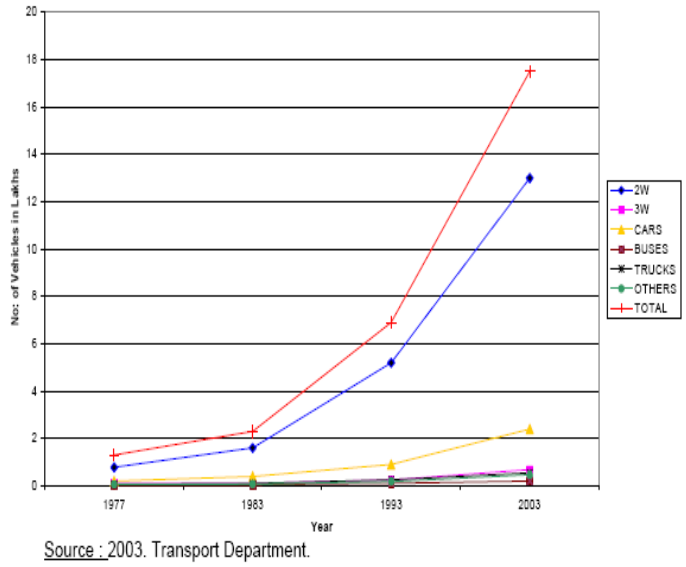


Source : RITES, 2003, cité dans SCE-CREOCEAN, 2005

Ces chiffres montrent l'importance des transports publics (bus et rickshaws) qui répondent à la demande de 5 ménages sur 10, mais aussi la forte croissance des modes de transports individuels (3 ménages sur 10), et enfin la part non-négligeable des modes de transport non-motorisés (2 ménages sur 10).

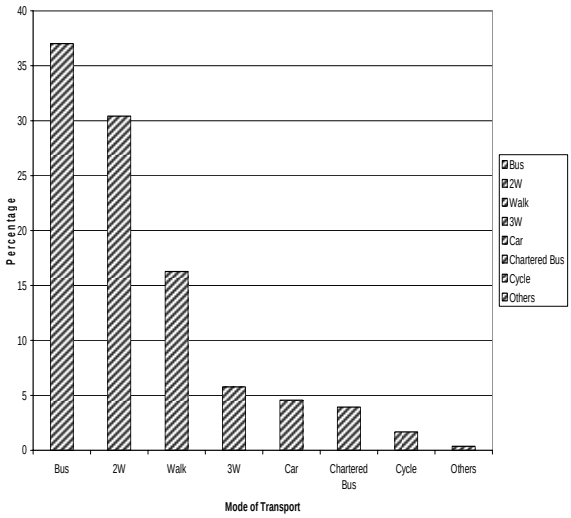
D'autre part, nous notons le déséquilibre entre la répartition modale et le trafic routier : alors que les transports publics (41%) dominent la répartition modale, les modes individuels représentent 87% du trafic (en nombre de véhicule), les bus 2%. (RITES, 2003)

Graphe 70 : Evolution des parcs de véhicules à Bangalore



Source : 2003. Transport Department.

Graphe 71 : Part modale des déplacements à Bangalore



source SCE-CREOCEAN, 2005

G - *Une structuration tendancielle alarmante*

En l'absence de contraintes naturelles, Bangalore s'étire aujourd'hui dans toutes les directions et le long des routes majeures de communication. La croissance urbaine le long de ces axes semble déterminée par le dynamisme et les localisations industrielles, les résidences occupant les espaces intermédiaires.

La carte d'expansion urbaine entre 1970 et 2003 met en avant la progression significative de l'urbanisation vers le Sud de l'agglomération, sur les territoires de Bommanahalli et Pattanagere mais aussi au-delà sur certaines portions de la ceinture verte. Cette croissance urbaine continue et massive progresse dans un cadran ouvert à 90° entre Mysore Road et Hosur Road.

A l'Ouest, mises à part quelques rares poches d'urbanisation récente, on peut observer un ralentissement de la croissance urbaine. L'urbanisation de ce secteur est dispersée et s'est plutôt localisée le long des deux grandes routes (Magadi et Tumkur roads). La perte de dynamisme actuel de la zone industrielle de Peenya et les contraintes topographiques peuvent expliquer ce ralentissement dans l'urbanisation dans ce secteur.

Au Nord, l'extension urbaine depuis dix ans a été considérable. Elle s'explique notamment par l'importance des espaces urbanisables libres et peu chers entre la ville et la ville satellite Yelahanka très dynamique économiquement, et par l'implantation de nombreuses industries attirées par le futur aéroport international devant se construire à l'est de Bellary road. Le développement urbain fut limité au nord-ouest du fait des importants sites militaro-industriels (Bharat Electronics Ltd, Hindustan Aeronautics Ltd, …). Il s'est plus orienté vers le Nord-Est.

Enfin à l'Est, on peut noter une urbanisation importante le long de Whitefield road et autour de la zone industrielle et technologique de Whitefield qui joue un rôle de pôle attractif. Au Sud-Est, l'aéroport a joué le rôle de barrière à l'extension urbaine.

Ainsi depuis 1990, la différence de développement de l'agglomération par secteurs géographiques (développement massif au Nord-Est et au Sud, développement linéaire le longs des axes routiers de Whitefield road à l'Est et de Hosur road au Sud Est) marque le passage d'une croissance urbaine spatiale auréolaire à un développement sectoriel et linéaire. Les emplois restent majoritairement concentrés en centre ville. Cette extension urbaine augmente les distances domicile-travail. On assiste au développement en aire résidentielle peu dense et loin des zones d'emplois. Ces urbanisations sont basées sur l'usage d'un transport individuel, voiture ou deux roues. La motorisation

croissante encourage en retour ce mode d'expansion urbaine. Un cercle vicieux se met dangereusement en place. Nous pouvons donc caractériser cette structuration urbaine comme un étalement urbain basé sur les modes de transport individuel, la voiture et les deux roues.

H - *La menace d'engorgement*

Même si les embouteillages se multiplient aux heures de pointe, Bangalore reste une ville où la circulation s'effectue encore assez commodément. Mais cela ne va plus durer très longtemps. La moitié de la population connaît une élévation du niveau de vie qui commence déjà à se traduire par un accroissement du taux de motorisation. Avant cinq ans, l'engorgement sera la règle, d'autant plus que le mode de développement en lotissements périphériques est un incitateur puissant à l'usage de la voiture individuelle.

Le réseau routier de Bangalore a une structure en étoile qui converge vers le centre de la ville. Sur ce réseau principalement constitué d'une dizaine d'axes se concentrent le trafic centre-périphérie et le trafic de transit (périphérie-périphérie) qui asphyxient le centre-ville. Les axes eux-mêmes sont congestionnés du fait des activités industrielles et commerciales qu'ils accueillent.

Le réseau routier de Bangalore n'est pas adapté au rythme et au mode de croissance actuelle des transports urbains à Bangalore. D'une part la capacité du réseau est faible : il occupe 10 à 15% de l'espace urbain, ce qui est relativement faible par rapport aux standards internationaux. Le réseau s'est développé de 11% en six ans ce qui est très peu comparé à la croissance géographique de la ville. D'autre part la qualité du réseau est pauvre : la proportion des routes asphaltées est inférieure à 20%.

La congestion du trafic, l'augmentation des temps de déplacement, la restriction de la mobilité et, pour finir, la perte d'une certaine qualité de vie, peuvent avoir un impact direct sur le dynamisme économique de la ville.

II - Application de TRANUS-SETU à Bangalore

Dans cette section, nous présentons en détail les différentes étapes de l'application de TRANUS puis de la SETU sur notre cas d'étude, Bangalore.

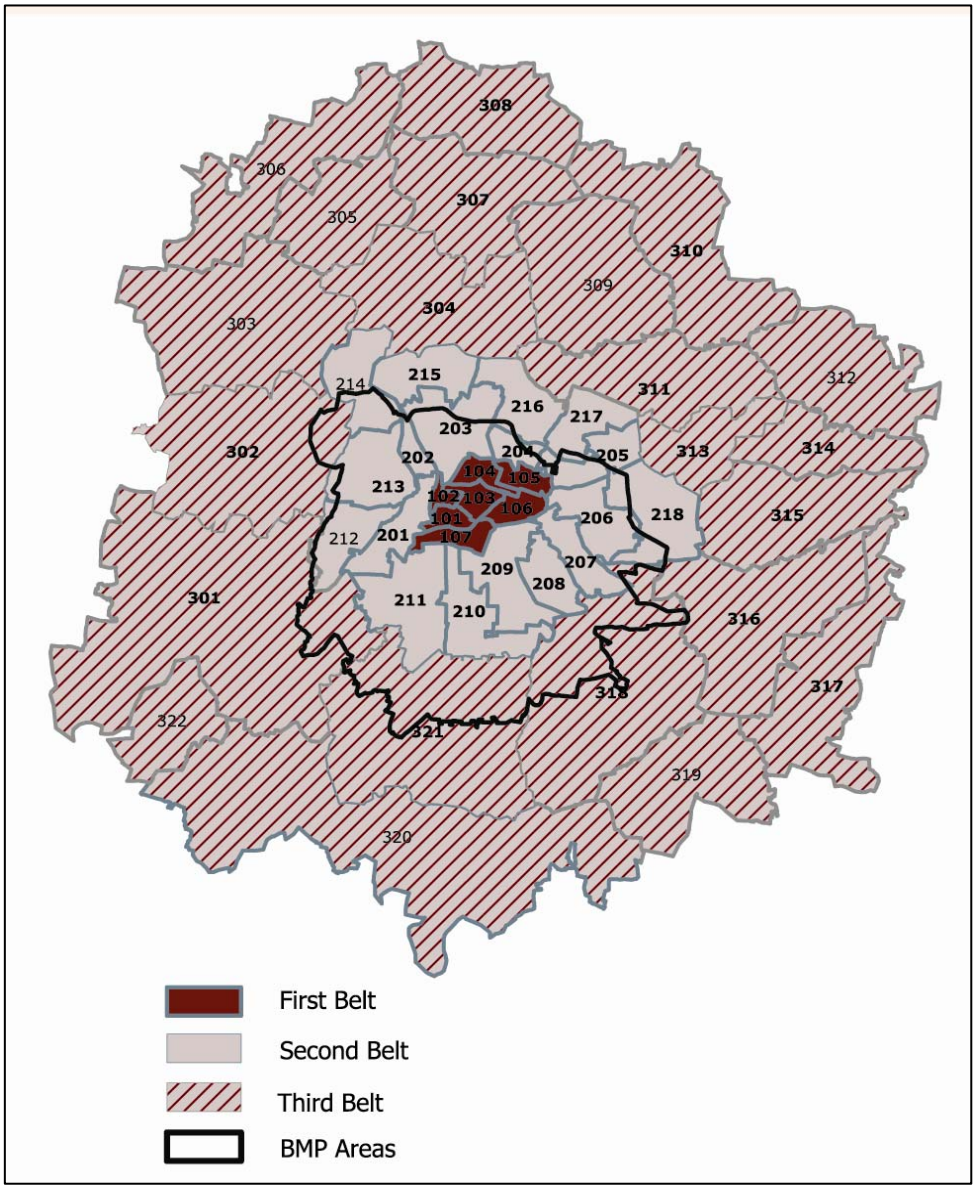
A - *Application de TRANUS à Bangalore*

L'agglomération de Bangalore a été divisée en 47 zones. Pour délimiter ces 47 zones, nous avons dû arbitrer entre les frontières administratives, le format de présentation des données et l'homogénéité des territoires. La ville est donc représenté par

- Un centre ville : 7 zones centrales qui constituent le centre historique de Bangalore et accueillent l'essentiel des emplois, des services commerciaux et administratifs, et donc des destinations des déplacements. L'ensemble du réseau de transport converge vers ce centre ce qui provoque une congestion dans les zones péricentrales.
- Une première couronne : 18 zones péri-centrales qui présentent des profils différents : certaines sont encours de valorisation (pépinière spontanée pour les activités liées aux Technologies de l'information), d'autres en voie de dégradation (ancienne centre d'artisanat traditionnel).
- Une deuxième couronne : 22 zones périphériques traversées par un périphérique (Outer Ring Road). C'est un territoire socialement contrasté où on trouve aussi bien les zones sous-développées que les quartiers de haut standing.

Carte 38 : Division zonale de Bangalore

	No	Zones
Centre Ville	101	Petta
	102	Majestic
	103	Gandhi Nagar
	104	Vasant Nagar
	105	Shivajinagar
	106	Richmond Town
	107	Chamarjapet
Première Couronne	201	Kempapura Agrahara
	202	Srirampuram
	203	Malleshwaram
	204	Benson Town
	205	Baiyyappanahalli
	206	Indira Nagar
	207	Defense
	208	Koramangala
	209	Shanti Nagar
	210	Jayanagar
	211	Banashankari
	212	Vijayanagar
	213	Rajajinagar
	214	Peenya
	215	Mathikere
	216	Kaval Byrasandra
	217	Kammanahalli
	218	CV Raman Nagar
Deuxième Couronne	301	Kengeri
	302	Herohalli
	303	Makali
	304	Byatarayanapura
	305	Byalakere
	306	Hesarghatta
	307	Yelahanka
	308	Bettaalasuru
	309	Tanisandra
	310	Bagaluru
	311	Horamavu
	312	Avalahalli
	313	KR Puram North
	314	Sadara Mangala
	315	Whitefield
	316	Varthur
	317	Dommasandra
	318	Begur
	319	Electronic City
	320	Bannerghatta
	321	Anjanapura
	322	Kumbalgodu



Source : SCE-CREOCEAN, 2004

Conformément au principe de la base économique proposé par Hoyt (Hoyt, 1954) et présentée dans le chapitre 5 (chapitre 5, III.B.1), les activités urbaines ont été séparées en :

- activités basiques :
    - les industries lourdes traditionnelles.
    - les activités liées aux technologies de l'information.
    - les services administratifs (qui ne participent pas au marché foncier).
- activités induites :
    - les services commerciaux.
    - les services éducatifs (qui ne participent pas au marché foncier).

Le foncier a été divisé en 3 catégories :

- le foncier à usage mixte qui accueille les résidences, les activités TI et les services commerciaux.
- le foncier à usage résidentiel qui accueille les résidences.
- le foncier à usage industriel qui accueille les industries traditionnelles et les activités TI.

La population a été divisée en cinq groupes correspondant aux quintiles de revenus (division de la population en fonction du revenu par tranche de 20%).

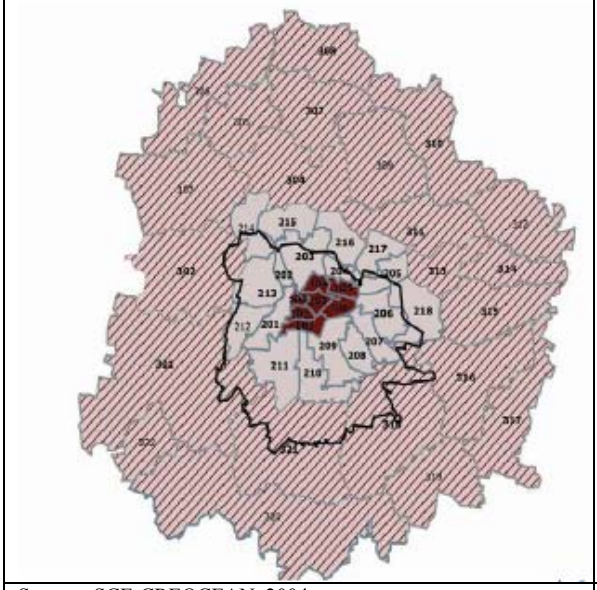
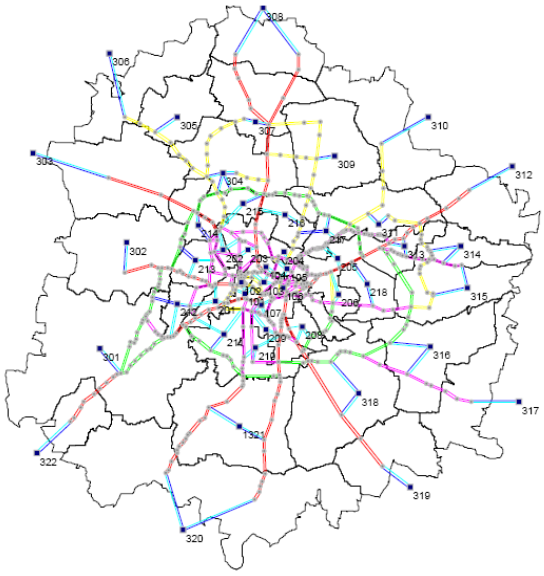
Pour chaque quintile de population, nous avons défini deux catégories de transport selon que le déplacement soit un trajet domicile-travail ou un trajet domicile-école. Ces deux catégories de déplacement représentent respectivement 60% et 20% des déplacements totaux dans l'agglomération. Etant donné que les déplacements n'ayant pas le domicile comme point de départ ou d'arrivée en représentent 1,3% et que Bangalore se caractérise par une grande mixité fonctionnelle, on peut penser que les déplacements non compris dans ces deux catégories sont négligeables en terme de distance parcourue. Nous avons donc décidé de ne considérer que ces deux catégories dans la simulation.

Pour le système de transport, nous avons représenté 2 modes de transports et 5 opérateurs :

- public :
    - le bus avec un réseau constitué des 39 principales lignes.
    - le rickshaw.
- privé :
    - la voiture.
    - la moto.
    - la marche à pied.

Le réseau viaire est constitué de 1547 segments et de 8949 combinaisons de routes différentes. Les segments de routes sont classés en 5 catégories qui se différencient par leurs caractéristiques (capacité de charge, vitesse à vide, …) :

- «arterial»
- «sub-arterial»
- «main road»
- «ring road»
- «connection road»

Carte 39 : Division de Bangalore en 48 zones	Carte 40 : Représentation graphique de Bangalore dans TRANUS
	
Source : SCE-CREOCEAN, 2004	Source : élaboration par l'auteur

B - *Application de la Signature Energétique des transports Urbains (SETU) à Bangalore*

Il existe deux méthodes pour relier la consommation d'énergie d'un véhicule et la vitesse de déplacement.

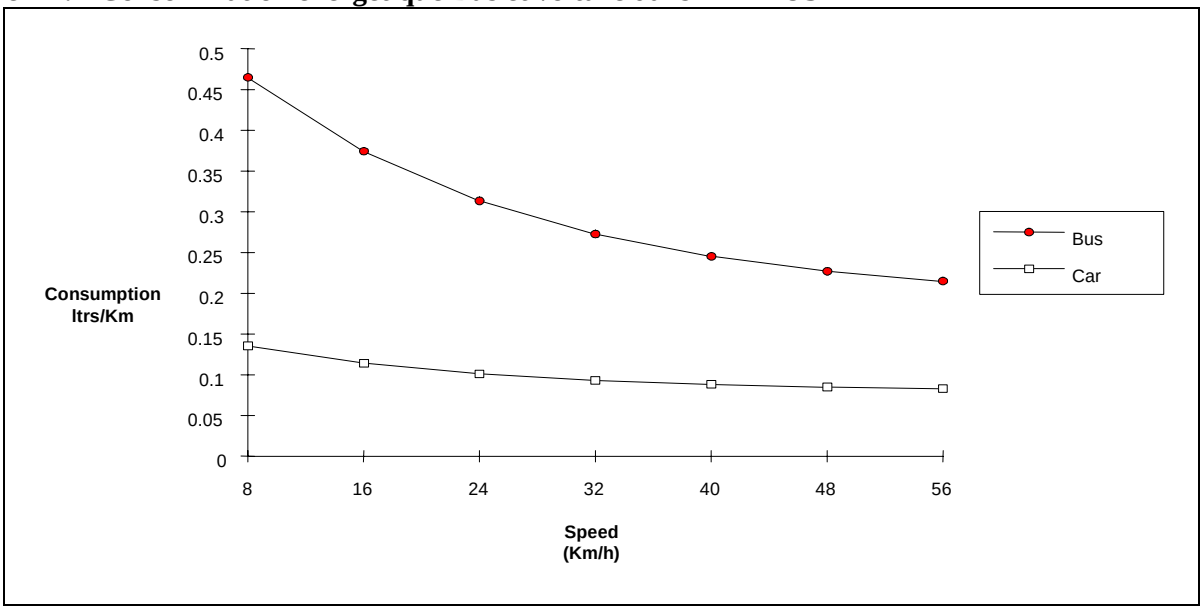
TRANUS utilise des fonctions exponentielles négatives de la vitesse pour calculer les consommations énergétiques des différents véhicules.

Conso E = [(Emin +(Emax – Emin) * exp(-μ.V)]

Où

Conso E	énergie consommée par unité de distance par le véhicule
Emin	énergie minimale consommée par unité de distance quand le véhicule roule dans un trafic parfaitement fluide.
Emax	énergie maximale consommée par unité de distance quand le véhicule roule à une vitesse proche de 0.
μ	paramètre déterminant la pente de la courbe de consommation d'énergie selon la vitesse.
V	vitesse du véhicule.

Graphe 72 : Consommation énergétique Bus et voiture dans TRANUS



source : www.modelistica.com

A cette fonction exponentielle, nous préfèrerons une courbe en U (adaptée à chaque type de véhicule) plus proche de la réalité. Nous savons en effet que selon le type de véhicule la consommation optimale se rencontre pour des vitesses situées autour de 50 km/H. En deçà, quand la congestion augmente, l'énergie consommée par unité de distance croît. De même au-delà de la vitesse optimale, la consommation par unité de distance augmente aussi.

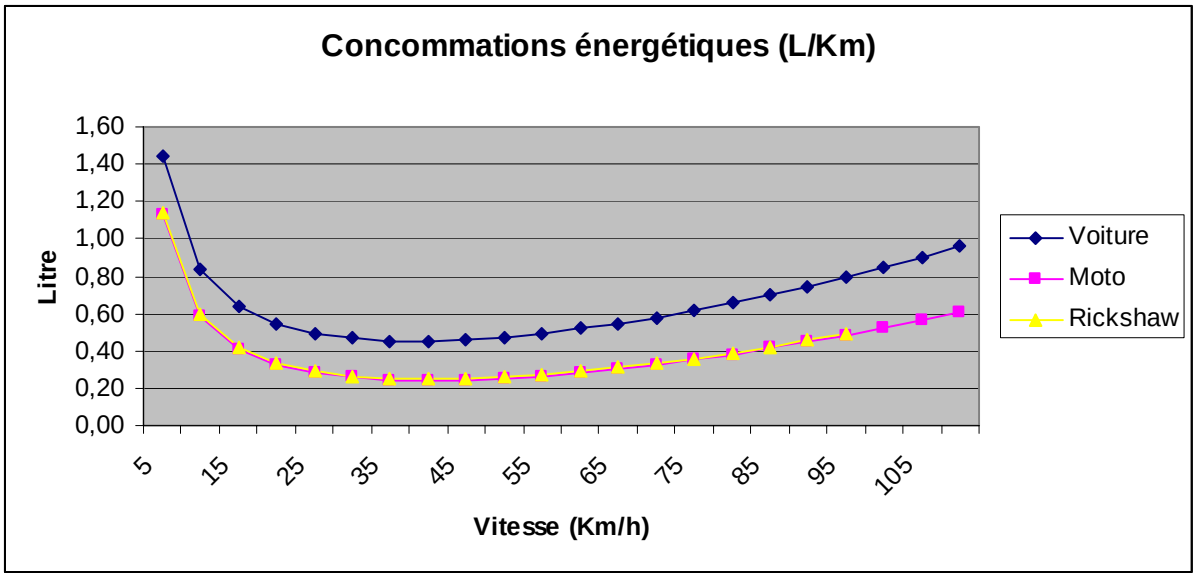
La formule de TRANUS permet de prendre en compte la sur-consommation d'énergie liée à la congestion, mais ne permet pas de calculer celle liée à une vitesse de déplacement excessive. Le concepteur de TRANUS, de la Barra, a choisi cette option car TRANUS est un modèle conçu avant tout pour les municipalités. Il n'y a donc aucune raison de prendre en compte dans les bilans financiers d'une politique publique la sur-consommation d'essence liée à une vitesse excessive, qui n'est pas de la responsabilité des autorités mais du chauffeur.

Pour nos recherches il est essentiel de prendre en compte aussi bien les effets de la congestion que ceux d'une vitesse excessive. Nous avons donc opté pour des courbes en U.

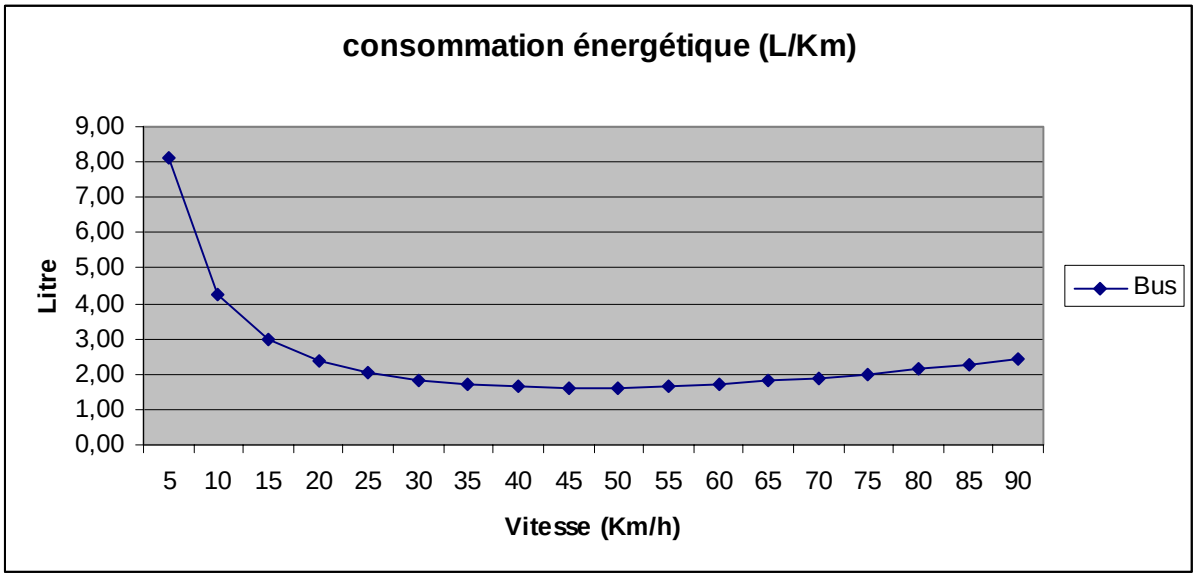
Pour cela nous nous sommes basés sur les relations adaptées aux types de véhicule et au contexte de circulation des villes indiennes fournies par l'Indian Road Congress (IRC, 1995).

Pour des voitures de technologie neuve:
$FC = 21,85 + (504,15 / V) + 0,004957xV^2$
Pour des voitures de technologie ancienne:
$FC = 10,31 + (1675,52 / V) + 0,0133xV^2$
Pour les deux roues:
$FC = 3,38 + (549,57 / V) + 0,00436xV^2$
Pour les rickshaw :
$FC = 4,13 + (549,57 / V) + 0,00436xV^2$
Pour les bus:
$FC = 32,97 + (3904,64 / V) + 0,0207xV^2$

Où:
FC consommation de fuel en litre pour 100 km
V vitesse du véhicule en km par heure



Source: Elaboration par l'auteur à partie de (IRC, 1990); (Bangalore Transport Department, 2003)



Source: Elaboration par l'auteur à partie de (IRC, 1990); (Bangalore Transport Department, 2003)

A partir des données du département des transports de Bangalore (Bangalore Transport Department, 2003), nous considérons que, à Bangalore, 90% des voitures sont de technologie ancienne et 10% de technologie neuve.

Nous avons ainsi pu calculer les consommations énergétiques des différents véhicules à partir de la matrice des déplacements fournie par TRANUS.

Les émissions de gaz à effet de serre ont été calculées en se basant sur les facteurs de conversion proposés par l'IEA pour le contexte indien :

Type de source d'énergie						
	Energy Content (Btu / litre)	Energy Content (megajoules / litre)	Carbon content of fuel	CO_2 emissions per litre	CO_2 emissions per litre gasoline equiv	
essence	33 025	34,84	0,639	2,416	2,416	kg/litre
diesel (distillate)	36 645	38,66	0,732	2,865	2,582	kg/litre
CNG				1,727	1,727	kg/litre
LPG				2,083	2,083	kg/litre
electricity				0	0,000	kg/litre
hydrogen				0	0,000	kg/litre
ethanol	21 797	23,00		1,640	2,484	kg/litre
biodiesel	29 392	31,01		2,378	2,672	kg/litre

Source: IEA, WBCSD, 2005

A partir des données du département des transports de Bangalore (Bangalore Transport Department, 2003), nous considérons qu'à Bangalore en 2003

- 100% des rickshaws consomment de l'essence,
- 90% des voitures consomment de l'essence et 10% du diesel,
- 100% des deux roues consomment de l'essence
- 100% des bus consomment du diesel.

Comme nous le verrons dans le paragraphe sur la construction des scénarii (cf. III.A.1), nous ne simulerons ni l'évolution des technologies ni la substitution des carburants.

III - Construction des scenarii étudiés

Nous avons discuté dans le chapitre 2 de la thèse les leviers d'actions à la disposition des aménageurs urbains pour placer les transports dans les villes du Sud sur des trajectoires environnementalement soutenables. La construction des scenarii que nous allons simuler avec TRANUS-SETU sur Bangalore s'appuie sur les conclusions de cette discussion et sur les enseignements tirés des analyses menées sur Bogota et les effets du TransMilenio dans la deuxième partie de la thèse.

Nous rappelons tout d'abord brièvement les débats sur les moyens à la disposition des aménageurs urbains, puis nous présentons les scenarii possibles et enfin les scenarii de politiques urbaines que nous choisissons de tester avec TRANUS-SETU sur Bangalore.

A - *Les débats*

1) Efficacité environnementale des véhicules

Quel potentiel de réduction des consommations énergétiques et des émissions ont les politiques d'amélioration de l'efficacité environnementale des véhicules (mesures «*end of pipe*») ?

L'efficacité énergétique de ces leviers d'action peut être évaluée par TRANUS-SETU au travers de la variation des courbes de consommations énergétiques et d'émissions de CO_2 en fonction de la vitesse des différentes catégories de véhicule. Nous avons présenté dans le chapitre 2 une revue de la littérature qui conclut à l'incapacité de ce type de progrès technologiques à satisfaire seul aux exigences de lutte contre le changement climatique. Et cela d'autant plus si on prend en compte les spécificités des villes du Sud, à savoir la pauvreté, la faible capacité de gestion des autorités et la forte

croissance démographique. Ces mesures sont indispensables mais largement insuffisantes pour le long terme qui nous préoccupe. Nous choisissons de ne pas intervenir sur ces leviers dans nos scenarii sur Bangalore.

2) Programme d'investissement dans les infrastructures de transports

Dans quelle infrastructure de Transport Rapide de Masse (TRM) est-il plus efficace d'investir ? Un système métro ? Une option Bus Rapid Transit (BRT) ?

A Bangalore, le programme d'investissement dans les infrastructures de transport est fortement débattu. Les ingénieurs transport se sont traditionnellement inspirés d'une approche « trafic » (cf. encadré 1, chapitre 1) et leur tâche à constituer à maintenir la vitesse des véhicules empruntant la voirie (politique « rien »). Les tenants du métro ont semble-t-il réussi à prouver l'inefficience des investissements massif dans les infrastructures routières (politique « tout route »). La construction de deux lignes de métro est en effet aujourd'hui en projet (politique « métro »). SCE-CREOCEAN, bureau d'étude en charge de l'élaboration du plan d'urbanisme « Bangalore 2020 », a pour sa part intégré une option Bus Rapid Transit (BRT) dans sa stratégie (politique « BRT »).

3) Politiques d'usage des sols

Faut-il une ville dense et monocentrique, une ville étalée et polycentrique, ou une ville duale ? Comment réaliser ce projet urbain ? Quelle est la bonne combinaison des instruments à la disposition des urbanistes ? « *Transit Oriented Development* » ? POS ? COS ? Taxes foncières ? «Ceinture verte» ?

Depuis 2003, trois scénarii urbains s'affrontent à Bangalore : le scénario du « laisser-faire », le scénario « corridor TI » et le scénario de « densification et monocentrisme ».

Le premier n'est que le prolongement des évolutions actuelles, sans intervention planificatrice nouvelle (politique « rien »). C'est le scénario du laisser-faire, qui n'est produit que pour valoriser les deux autres.

Le vrai débat se situe entre ces deux derniers scénarii, résolument volontaristes et tendus vers un objectif commun : faire de Bangalore une métropole de rang mondial. Plus que des scénarios, ce sont de véritables épures refondatrices. Nous pouvons cependant regretter qu'elles n'émanent pas d'une réflexion conduite par les décideurs politiques. Ce sont des articles de presse, des rapports d'ONG, et surtout la compétition entre les consultants des diverses administrations techniques qui ont peu à peu créé le débat. Celui-ci s'est cristallisé sur deux conceptions opposées, l'une émanant d'un bureau d'études de Singapour JURONG, l'autre d'un consultant français SCE-CREOCEAN.

Le deuxième scénario est celui du projet commandé en août 2001 au bureau de consultance singapourien JURONG, et présenté aux autorités de Bangalore en janvier 2003. Il est bâti autour d'un concept de « corridor des technologies de l'informatique »[138], auquel sera réservé tout le secteur Est-Sud-Est de l'agglomération, où se trouvent déjà, depuis les années 1980, deux parcs technologiques : Electronic City et Whitefield. Entre ces deux parcs, l'espace est encore libre de toute urbanisation et les prix du foncier restent très attractifs. Un tel projet marquerait une rupture avec le reste de la ville, voire une sécession. Ce faisant, cette proposition s'inscrit dans la continuité de l'urbanisme

[138] Le corridor TI s'étendra en arc de cercle sur 25 kilomètres de long et 7,5 kilomètres de large, délimitant une aire constructible de 140 kilomètres carrés. Une partie de cette superficie (20%) sera réservée aux entreprises, qui devraient pouvoir offrir 750.000 emplois. Une autre partie (40%) est destinée à la fonction résidentielle, mais ne devrait accueillir que les travailleurs aux plus hauts revenus, soit tout de même une population d'un million d'habitants (40% des emplois). On prévoit de limiter la densité globale à 70 habitants à l'hectare, ce qui est faible compte tenu d'une assez grande proximité avec le centre de la ville. Les aménagements seront de très haut standing, afin de séduire les entreprises du monde et leurs cadres. Au total, ces nouveaux habitats devraient être autosuffisants en termes d'équipements et de cadre de vie.

bangalorien des dernières décennies, plus attaché à gérer l'expansion urbaine qu'à la construire comme un tout cohérent, et il prend acte de l'existence des deux parcs technologiques déjà réalisés dans les années 1980. Le projet JURONG n'évoque nulle part la problématique de l'agglomération dans son ensemble, ni même la question des liens et de l'intégration de ce corridor TI avec le reste de la ville. La question des transports entre le corridor et la ville est envisagée sous le seul angle de l'augmentation de la capacité des axes routiers radiaux et de la construction d'autoroutes urbaines. Le corridor TI se veut autosuffisant. Cette option peut donc paraître dangereuse pour l'avenir. Pourtant, une autre analyse pourrait relativiser ce jugement tranché. Nous observons en effet que le développement privilégié d'un secteur du cadran urbain est un phénomène courant en Inde et ailleurs. Plus explicitement encore, la ville à deux vitesses, les zones de développement spécial, justifiées par l'espoir de les voir tirer ensuite le reste du territoire, sont des stratégies bien assumées dans les pays d'Asie, par exemple en Chine et au Vietnam. C'est cette observation qui nous a conduit à proposer un aménagement de ce scénario (politique « dualisation urbaine »).

L'exemple de l'agglomération francilienne en a fourni l'inspiration. L'antagonisme entre deux centralités, celle du vieux Bangalore et celle du corridor TI à venir, nous rappela que Paris possédait aussi son centre d'affaires hors les murs. La Défense était née d'un même désir de modernité « re »fondée sur une base entièrement nouvelle, une dalle en l'occurrence. Transporté largement à l'écart de la ville de Paris, ce champ d'expérimentation d'une architecture futuriste devait en outre délivrer le tissu parisien de l'éventualité d'une telle intrusion. Mais une qualité particulière du dispositif francilien est la filiation historique unissant les quartiers d'affaires séculaires (premier et huitième arrondissements) et le centre de la Défense, génétiquement reliés par l'axe majeur issu du Louvre et des Champs-Elysées. C'est cet équilibre fonctionnel entre deux pôles, l'un ancré dans la ville et jouissant des qualités propres à celle-ci, l'autre offrant aux investisseurs un espace voué à l'innovation, qui pourrait trouver une application à Bangalore. A partir d'un tel axe bicéphale, une diffusion différenciée de l'énergie entrepreneuriale pourrait bénéficier à la fois au tissu urbain central et à la périphérie. Nous pourrions ainsi espérer que l'intégration économique qui caractérisait jusqu'ici la ville de Bangalore ne soit pas passée par pertes et profits, et qu'elle puisse au contraire continuer de créer un milieu favorable au développement des industries nouvelles. Inversement, le tissu de petites et micro-entreprises des quartiers anciens pourrait trouver, dans un échange plus aisé et plus naturel avec la nouvelle économie, une ouverture bénéfique.

Le troisième scénario en débat (politique « densification monocentrisme ») est celui sur lequel a travaillé le consultant français SCE-CREOCEAN, pour élaborer le plan d'urbanisme de Bangalore à l'échéance 2020. Le travail préparatoire se fit en 2003, et le Master Plan fut proposé aux autorités en 2005. S'il a été officiellement validé comme le plan d'urbanisme de Bangalore d'ici 2020, il est encore très controversé et son application semble très incertaine. Ce scénario considère qu'il est préférable de prolonger d'une manière sélective et structurante les espaces déjà urbanisés, plutôt que d'envisager de nouvelles urbanisations à créer *ex nihilo* au milieu des campagnes. Les raisons avancées sont le coût élevé des implantations nouvelles, la nécessité de concentrer l'effort sur les infrastructures actuelles, souvent déficitaires et déficientes, et la conviction que l'espace intérieur au futur périphérique suffit pour les quinze années à venir. Si elle est moins spectaculaire que la proposition de JURONG, celle-ci n'en est pas moins ambitieuse. Elle s'apparente davantage à l'esprit du « renouvellement » urbain, par petites touches appliquées à l'existant, qu'à celui d'une « refondation » radicale. Toutefois, en envisageant la ville dans sa totalité, elle refonde au moins l'approche urbanistique antérieure. Nous ne faisons ici que résumer une analyse sophistiquée, qui intègre l'histoire de la ville et préconise dans le détail de nouvelles règles du jeu : une nouvelle réglementation de l'usage du sol, l'abandon du zonage, une refonte de la contractualisation, etc.

4) Politiques des prix

Quelle est l'efficacité des politiques de prix «push & pull» ? Faut-il augmenter le coût de l'usage des véhicules particuliers (voiture et moto) au travers du coût du carburant ? Du coût de stationnement ? Faut-il subventionner les transports publics ? Augmenter leur vitesse ? Leur confort ? Leur fréquence ? Augmenter le coût de l'usage des taxis (rickshaw) ? Faut-il des péages urbains ?

Les conclusions du chapitre 2 sont :

Le choix modal est basé sur une évaluation comparative des temps et coûts de transport et confort des différents modes en compétition. Améliorer la vitesse, le confort et la fréquence des bus ou du métro devrait donc contribuer à augmenter la part modale des transports en commun et diminuer le nombre de déplacements en véhicules particuliers. Selon la théorie économique diminuer le prix d'un bien fait croître son usage. L'espoir est donc que si les transports en commun sont moins chers (au sens du coût généralisé), plus de passagers vont les choisir au lieu de leur voiture ou moto.

Pourtant la constante de Zahavi signifie que, si les temps et coûts de transport que les passagers sont disposés à dépenser ne sont pas entièrement consommés, les individus ne vont pas profiter de cette économie et vont se déplacer plus afin d'étendre leur sphère d'activités et de contact. Ainsi la distance des déplacements en voiture comme en bus augmenterait. Ce qui inciterait à l'étalement urbain et à la déconcentration des résidences et lieux de travail.

L'effet environnemental d'une augmentation des coûts d'opération des véhicules particuliers est supposé positif étant donné qu'elle contribue à réduire l'usage de ces modes de déplacement. Le bénéfice des passagers auto-motorisés est négatif. Le bénéfice des passagers en transport en commun est amélioré par le gain de vitesse et réduit par la perte de confort.

Augmenter le prix du parking dans le centre ville ou créer un péage à son entrée rendent les véhicules particuliers moins attractifs pour les déplacements vers le centre ville. Cela induit un report sur les transports en commun. Mais ces politiques sont à double tranchant. Des prix de parking ou de péage trop élevés rendent les magasins du centre ville moins attractifs que les grands centres commerciaux situés en périphérie où le parking est gratuit. A long terme, ces mesures peuvent entraîner une périphérisation des activités commerciales.

Les débats sur l'efficacité des politiques de prix sont peu présents dans les discussions sur et à Bangalore. Par contre ces politiques ont déjà été appliquées dans d'autres villes en développement, à Bogota par exemple. Aussi nous intégrons ces actions dans les scénarii volontaristes (politique « + »), comme leviers actionnés pour renforcer une stratégie, mais nous ne les étudions pas spécifiquement.

5) Intégration des politiques urbaines

L'intégration de ces trois politiques améliore-t-elle significativement les consommations énergétiques et émissions de CO_2 liées aux transports urbains ? Quelle combinaison est la plus efficace ?

Dans le chapitre 2, nous avons avancé la thèse d'une nécessaire « prise en tenaille » des consommations énergétiques et émissions de CO_2 liées aux transports urbains entre des politiques de transport et d'usage des sols intégrées et complémentaires. Cette thèse s'appuie sur les conclusions de l'analyse des déterminants des consommations énergétiques menées dans le chapitre 1 : le couple « transport – usage des sols » est au cœur des dynamiques de structuration de l'espace urbain, et par là des trajectoires de consommations énergétiques et émissions de CO_2 liées aux déplacements urbains.

Il s'agit donc de tester avec TRANUS-SETU dans quelle mesure et selon quelle combinaison l'intégration de politiques de transport et d'usage des sols complémentaires permet de réduire significativement les consommations d'énergie sur le long terme.

B - *Les scénarii possibles*

Tableau 55 : Présentation des scénarii possibles

Politique d'usage des sols **Programme d'investissement**	**1. Rien**	**2. Densification monocentrisme**	**4. Dualisation urbaine**	**/ Politique Prix**
A. Rien	**BAU**			**i. Rien**
				ii. Pol Prix
B. Tout route	**ROUTE**			**i. Rien**
				ii. Pol Prix
C. Métro	**METRO-**			**i. Rien**
		METRO+		**ii. Pol Prix**
D. BRT	**BRT-**			**i. Rien**
			BRT+	**ii. Pol Prix**

Source : Elaboration par l'auteur

C - *Les scenarii choisis*

1) Scénario Business As Usual (« BAU »)

Ce scénario que l'on pourrait qualifier de « scénario Manille » simule la continuité des politiques appliquées depuis une quinzaine d'années. Il suppose un investissement minimal dans les infrastructures routières, juste le nécessaire pour maintenir les conditions de mobilité dans leur état de dégradation déjà avancée. Sur les autres aspects de politique urbaine, il reprend les pratiques actuellement observables, c'est-à-dire l'absence d'intégration entre les modes de transport et entre les politiques de transport et d'urbanisme.

Construction TRANUS : scénario « BAU »

Ce scénario au fil de l'eau suppose la continuité dans les tendances observées depuis une quinzaine d'années à Bangalore. Nous le traduisons dans TRANUS par :

a) Les politiques d'usage des sols : urbanisation spontanée

b) Le programme d'investissement dans les infrastructures de transport : interventions limitées aux endroits les plus critiques du réseau routier par construction de « *flyover* » et « *underpass* », élargissement des voies et conversion de routes double sens en routes à sens unique – temporairement, aux heures de pointes ou définitivement (*one-way policy*)

c) Et les politiques de prix : prêt à taux intéressant pour l'achat d'un véhicule particulier.

Plus précisément :

a) Les politiques d'usage des sols :

Dans le centre ville (les zones 100') : aucune politique de densification ni d'occupation des terrains vacants (qui ne sont pas mis à disposition pour de nouvelles urbanisations).

Dans la première couronne (les zones 200') : la moitié des terrains vacants sont mis à disposition pour de nouvelles urbanisations.

Dans la deuxième couronne (les zones 300') : pour les zones non-périphériques, l'ensemble des terrains vacants, des terrains ouverts et des terrains agricoles sont mis à la disposition des développeurs urbains. Pour les zones périphériques (zones 303, 306, 308, 310, 312, 317, 319, 320,

322), ouvertes sur l'hinterland de Bangalore, les terrains mis à la disposition des développeurs urbains sont infinis.

b) Les politiques d'investissement dans les infrastructures de transport :

En 2008, le programme d'investissement dans les infrastructures routières consiste à mettre en œuvre ce qui a déjà été voté : construction d'un Inner Ring Road (IRR) (dans un rayon de 3 – 5 km du centre ville) et d'un Peripheral Ring Road (PRR) (dans un rayon de 18 - 20 km du centre ville). Ensuite les interventions se limitent aux parties du réseau routier dont la qualité du service atteint les niveaux de service G et H spécifiés par le Highway Capacity Manual de la Federal Highway Administration des Etats-Unis[139]. Le Highway Capacity Manual mesure le niveau de service d'un tronçon routier par le rapport entre la vitesse initiale en flux libre et la vitesse finale avec congestion. Les niveaux extrêmes G et H sont caractérisés par des rapports respectivement de 0,25 à 0,18 et de 0,18 à 0.

Les interventions réalisées sont :

- en 2008 : construction de l'Inner Ring Road (120 km-voie, 1.202.000.000 INR, soit 22.050.619 euros[140]), du Peripheral Ring Road (420 km-voie, 4.200.000.000 INR) et le prolongement de Whitefield Road jusqu'au PRR (10,6 km-voie, 106.000.000 INR, soir 77.048.753 euros).
- en 2013 : intervention sur les points critiques soit 36,8 km-voie (368.000.000 INR, soit 6.753.334 euros)
- en 2018 : intervention sur les points critiques soit 53,2 km-voie (532.000.000 INR, soit 9.740.045 euros)
- en 2023 : intervention sur les points critiques soit 70,8 km-voie (708.000.000 INR, soit 12.962.315 euros)

L'investissement total sur les 20 années de simulation est de 7.116.000.000 INR (130.482.351euros), soit 10 fois moins que le budget prévu pour le projet métro. On peut noter que sur cet investissement plus de la moitié est consacrée à la construction du PRR qui, étant donné son éloignement du centre, servira essentiellement au trafic de fret.

Les lignes de bus existantes sont étendues jusqu'au PRR en 2013 et de nouvelles lignes de bus sont mises en place sur les deux nouveaux périphériques – IRR et PRR.

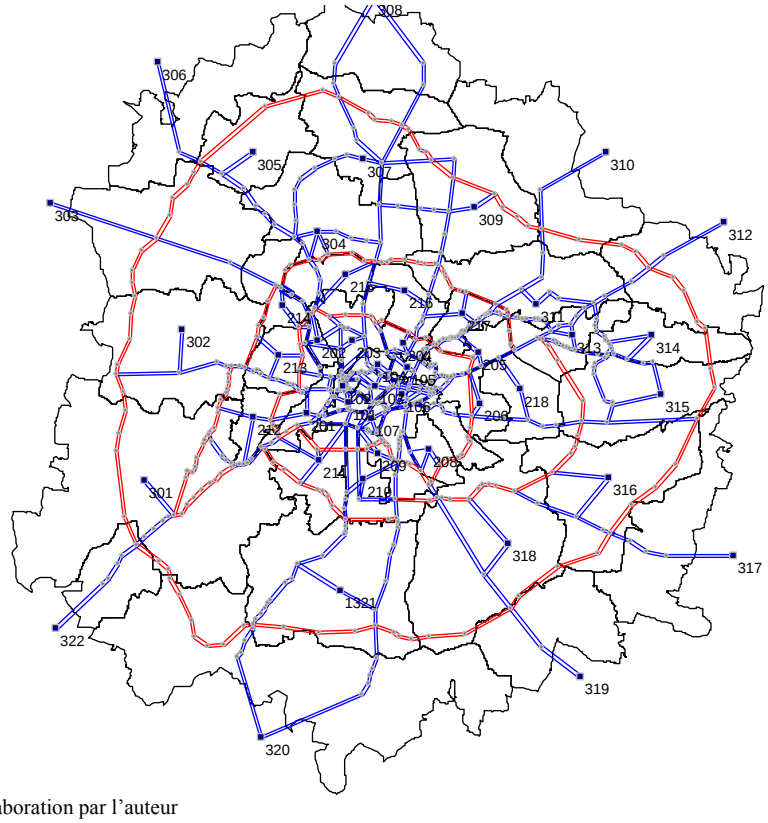
c) Les politiques de prix :

L'accessibilité aux véhicules particuliers est légèrement augmentée à chaque période de temps pour les catégories riches – quintiles III, IV et V – en diminuant les facteurs de pénalisation affectant la désutilité de l'automobile et de la moto. Cette augmentation de l'accessibilité représente la croissance du taux de motorisation mais n'impose pas directement un usage plus important des véhicules particuliers. Leurs usages dépendent des avantages – directs et indirects – qu'ils offrent, relativement aux autres solutions de transports.

[139] Transportation Research Board (TRB), 2000, *Highway Capacity Manual*, National Research Council, Washington, DC

[140] 1 INR = 0,0183481 euros (http://www.xe.com/ucc/convert.cgi, 25/05/2007)

Carte 41 : Représentation dans TRANUS des trois périphériques routiers : Inner Ring Road (IRR), Outer Ring Road (ORR) et Peripheral Ring Road (PRR)



Source : Elaboration par l'auteur

2) Scenario « ROUTE »

Ce scénario que l'on pourrait qualifier de « scénario Atlanta » simule l'impact d'une stratégie volontariste d'investissement massif dans les infrastructures routières. Dans une perspective « trafic », les deniers publics sont consacrés à l'amélioration de la vitesse des véhicules sur les routes. Sur les autres aspects de politique urbaine, il reprend les pratiques actuellement observables, c'est-à-dire l'absence d'intégration entre les modes de transport et entre les politiques de transport et d'urbanisme. Ce scénario « ROUTE » est identique au scénario Business As Usual sauf qu'il suppose un investissement massif dans les infrastructures routières – à hauteur du budget aujourd'hui débloqué pour financer le projet métro.

Construction TRANUS : scénario « ROUTE »

Nous le traduisons dans TRANUS par :

a) L'absence de politiques d'usage des sols : urbanisation spontanée

b) Le programme d'investissement dans les infrastructures de transport : interventions sur le réseau routier par construction de « *flyover* » et « *underpass* », élargissement des voies et conversion de routes double sens en routes à sens unique – temporairement, aux heures de pointes ou définitivement (*one-way policy*).

c) Et les politiques de prix : prêt à taux intéressant pour l'achat d'un véhicule particulier.

La différence essentielle entre ce scénario et le précédent est que les investissements dans les infrastructures routières dans le scénario « ROUTE » sont pratiquement six fois plus importants que dans le scénario « BAU ».

Plus précisément :

a) Les politiques d'usage des sols :

Les politiques d'usage des sols dans le scénario « ROUTE » sont identiques à celles simulées dans le scénario « BAU ».

Dans le centre ville (les zones 100') : aucune politique de densification ni d'occupation des terrains vacants (qui ne sont pas mis à disposition pour de nouvelles urbanisations).

Dans la première couronne (les zones 200') : la moitié des terrains vacants sont mis à disposition pour de nouvelles urbanisations.

Dans la deuxième couronne (les zones 300') : pour les zones non-périphériques, l'ensemble des terrains vacants, des terrains ouverts et des terrains agricoles sont mis à la disposition des développeurs urbains. Pour les zones périphériques (zones 303, 306, 308, 310, 312, 317, 319, 320, 322), ouvertes sur l'hinterland de Bangalore, les terrains mis à la disposition des développeurs urbains sont infinis.

b) Les politiques d'investissement dans les infrastructures de transport :

En 2008, le programme d'investissement dans les infrastructures routières consiste à mettre en œuvre ce qui a déjà été voté : construction d'un Inner Ring Road (IRR) et d'un Peripheral Ring Road (PRR). Ensuite les interventions s'effectuent sur les parties du réseau routier dont la qualité du service diminue. Le niveau de tolérance face à la congestion avant intervention est diminué par rapport au scénario « BAU » : il passe des niveaux G-H aux niveaux C-D. Les niveaux extrêmes C et D sont caractérisés par des rapports respectivement de 0,5 à 0,4 et de 0,4 à 0,3 entre la vitesse initiale en flux libre et la vitesse finale avec congestion.

Les interventions réalisées sont :

- en 2008 : construction de l'Inner Ring Road (120 km-voie, 1.202.000.000 INR, soit 22.048.308 euros), du Peripheral Ring Road (420 km-voie, 4.200.000.000 INR) et le prolongement de Whitefield Road jusqu'au PRR (10,6 km-voie, 106.000.000 INR, soit 77.040.677 euros). Intervention sur les autres portions où la qualité du service diminue soit 736,4 km-voie (11.046.000.000 INR, soit 202.608.492 euros).
- en 2013 : intervention «classique»[141]sur 178,4 km-voie (3.568.000.000 INR, soit 65.445.147 euros) et intervention «lourde»[142] sur 87,4 km-voie (3.496.000.000 INR, soit 64.124.231 euros)
- en 2018 : intervention «classique» sur 59.2 km-voie (1.184.000.000 INR, soit 21.717.131 euros) et intervention «lourde» sur 151.4 km-voie (6.056.000.000 INR, soit 111.099.943 euros)
- en 2023 : intervention «lourde» sur 239,2km-voie (9.568.000.000 INR, soit 175.529.104 euros)

L'investissement total sur les 20 années de simulation est de 40.426.000.000 INR (741.632.481 euros), soit 65% du budget métro.

c) Les politiques de prix :

Les lignes de bus existantes sont étendues jusqu'au PRR en 2013 et de nouvelles lignes de bus sont mis en place sur les deux nouveaux périphériques – IRR et PRR.

L'accessibilité aux véhicules particuliers est légèrement augmentée à chaque période de temps pour les catégories riches – quintiles III, IV et V – en diminuant les facteurs de pénalisation affectant la désutilité de l'automobile et de la moto. Cette augmentation de l'accessibilité représente la croissance du taux de motorisation mais n'impose pas directement un usage plus important des véhicules particuliers. Leurs usages dépendent des avantages – directs et indirects – qu'ils offrent, relativement aux autres solutions de transports.

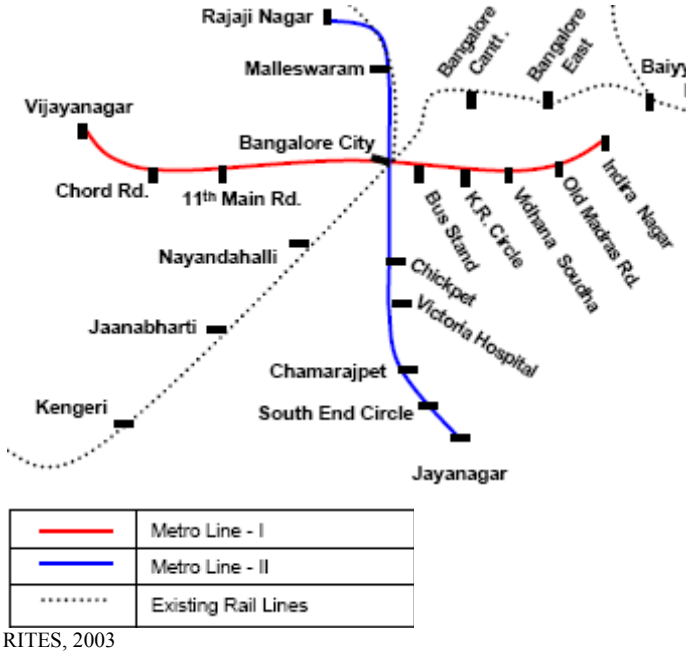
[141] Intervention «classique» : situation sans contrainte forte où la solution au problème de congestion peut être un élargissement de la voie (sans achat de foncier, ou peu, ou peu cher), ou une conversion «one way». 200 lakhs / Km-voie.

[142] Intervention «lourde» : situation plus délicate, dans des quartiers denses par exemple, où il est nécessaire de construire un flyover et/ou d'acheter du foncier. 400 lakhs / Km-voie

3) Scénario « METRO- »

Ce scénario « METRO- » est celui des deux premières lignes de métro de Bangalore dont la construction devrait commencer prochainement. Sur les autres aspects de politique urbaine, il reprend les pratiques actuellement observables, c'est-à-dire l'absence d'intégration entre les modes de transport et entre les politiques de transport et d'urbanisme. Il correspond à la stratégie que les autorités de Bangalore semblent avoir adoptée : la construction du métro devrait commencer en 2007 alors qu'aucun plan d'urbanisme n'a encore été validé.

Carte 42 : Tracé des deux lignes de métro en projet à Bangalore



Source : RITES, 2003

Construction TRANUS : scénario « METRO- »

Nous le traduisons dans TRANUS par :

a) L'absence de politiques d'usage des sols : urbanisation spontanée

b) Le programme d'investissement dans les infrastructures de transport : construction des deux lignes de métro.

c) Et les politiques de prix : prêt à taux intéressant pour l'achat d'un véhicule particulier.

Plus précisément :

a) Les politiques d'usage des sols :

Les politiques d'usage des sols dans le scénario « METRO- » sont identiques à celles simulées dans le scénario « BAU ».

Dans le centre ville (les zones 100') : aucune politique de densification ni d'occupation des terrains vacants (qui ne sont pas mis à disposition pour de nouvelles urbanisations).

Dans la première couronne (les zones 200') : la moitié des terrains vacants sont mis à disposition pour de nouvelles urbanisations.

Dans la deuxième couronne (les zones 300') : pour les zones non-périphériques, l'ensemble des terrains vacants, des terrains ouverts et des terrains agricoles sont mis à la disposition des développeurs urbains. Pour les zones périphériques (zones 303, 306, 308, 310, 312, 317, 319, 320, 322), ouvertes sur l'hinterland de Bangalore, les terrains mis à la disposition des développeurs urbains sont infinis.

b) Les politiques d'investissement dans les infrastructures de transport :

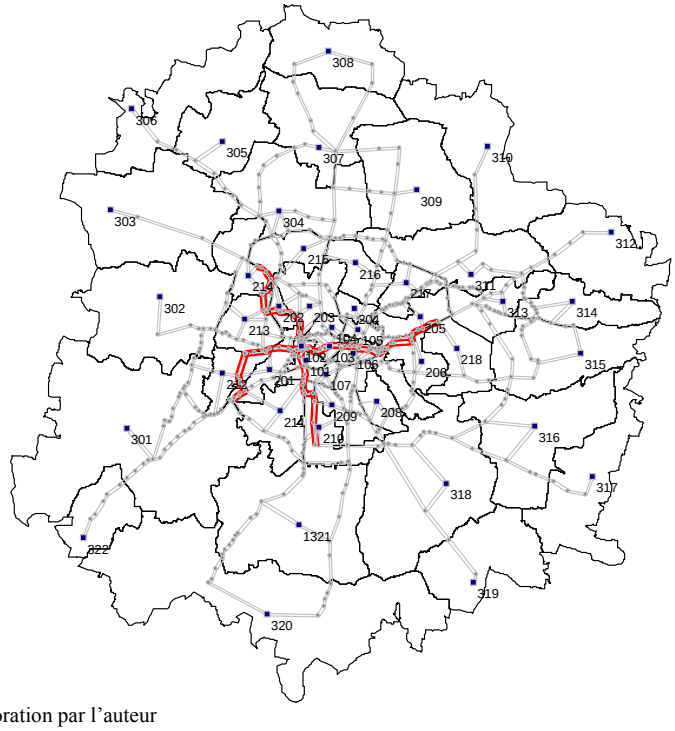
Le programme d'investissement dans les infrastructures de transport se limite à la construction en 2008 des deux lignes de métro.

L'investissement total sur les 20 années de simulation est de 62.070.000.000 INR, soit 1.138.673.709 euros.

c) Les politiques de prix :

L'accessibilité aux véhicules particuliers est légèrement augmentée à chaque période de temps pour les catégories riches – quintiles IV et V – en diminuant les facteurs de pénalisation affectant la désutilité de l'automobile et de la moto. Cette augmentation de l'accessibilité représente la croissance du taux de motorisation mais n'impose pas directement un usage plus important des véhicules particuliers. Leurs usages dépendent des avantages – directs et indirects – qu'ils offrent, relativement aux autres solutions de transports.

Carte 43 : Représentation dans TRANUS des deux lignes de métro à Bangalore



Source : Elaboration par l'auteur

4) Scénario « METRO+ »

Ce scénario que l'on pourrait qualifier de « scénario Barcelone » simule l'impact d'un métro associé à un urbanisme de densification et une politique de prix. C'est le scénario de l'intégration entre les trois leviers d'action de politique urbaine disponibles. Ce scénario « METRO+ » est celui des deux premières lignes de métro de Bangalore dont la construction devrait commencer prochainement. Mais à la différence du scénario « METRO- », la construction des lignes de métro est articulée à des politiques volontaristes de densification urbaine et de lutte contre l'usage des véhicules particuliers.

Construction TRANUS : scénario « METRO+ »

Nous le traduisons dans TRANUS par :

a) Les politiques d'usage des sols : densification du centre et de la première couronne, endiguement de l'étalement urbain dans la couronne périphérique.

b) Le programme d'investissement dans les infrastructures de transport : construction des deux lignes de métro.

c) Et les politiques de prix : lutte contre l'usage des véhicules particuliers.

Plus précisément :

a) Les politiques d'usage des sols :

Dans le centre ville (les zones 100') : la totalité des terrains vacants sont mis à disposition des développeurs urbains sous forme de sols mixtes – qui permet de plus grande densité. Les terrains industriels sont progressivement (5% par an) convertis en sols mixtes.

Dans la première couronne (les zones 200') : la totalité des terrains vacants sont mis à disposition des développeurs urbains.

Dans la deuxième couronne (les zones 300') : Aucune nouvelle terre n'est autorisée à l'urbanisation. Les terrains résidentiels sont progressivement convertis en sols industriels – dans des quantités équilibrant les conversions inverses du centre ville.

b) Les politiques d'investissement dans les infrastructures de transport :

Le programme d'investissement dans les infrastructures de transport se limite à la construction en 2008 des deux lignes de métro.

L'investissement total sur les 20 années de simulation est de 62.070.000.000 INR, soit , soit 1.138.673.709 euros.

c) Les politiques de prix :

Les facteurs de pénalisation affectant la désutilité de l'automobile et de la moto sont maintenus constants. Les coûts d'opération des véhicules particuliers sont augmentés sous la forme d'une taxe de 100% sur les carburants. Un coût de parking est appliqué dans le centre ville et la première couronne, respectivement l'équivalent de 30 et 15 minutes de la valeur moyenne du temps des quintiles IV et V.

5) Scénario « BRT- »

Ce scénario que l'on pourrait qualifier de « scénario Bogota » simule la construction d'un réseau important de Bus Rapid Transit, sans aucune intégration avec les deux autres leviers à la disposition des décideurs politiques. Ce scénario « BRT- » est le pendant du scénario « METRO- » version BRT. Le budget débloqué pour les deux lignes métro est cette fois consacré à la construction d'un BRT. Sur les autres aspects de politique urbaine, il reprend les pratiques actuellement observables, c'est-à-dire l'absence d'intégration entre les modes de transport et entre les politiques de transport et d'urbanisme.

Construction TRANUS : scénario « BRT- »

Nous le traduisons dans TRANUS par :

a) L'absence de politiques d'usage des sols : urbanisation spontanée

b) Le programme d'investissement dans les infrastructures de transport : construction de l'Inner Ring Road (IRR) et de neuf lignes de BRT.

c) Et les politiques de prix : prêt à taux intéressant pour l'achat d'un véhicule particulier.

Plus précisément :

a) Les politiques d'usage des sols :

Les politiques d'usage des sols dans le scénario « BRT- » sont identiques à celles simulées dans le scénario « BAU ».

Dans le centre ville (les zones 100') : aucune politique de densification ni d'occupation des terrains vacants (qui ne sont pas mis à disposition pour de nouvelles urbanisations).

Dans la première couronne (les zones 200') : la moitié des terrains vacants sont mis à disposition pour de nouvelles urbanisations.

Dans la deuxième couronne (les zones 300') : pour les zones non-périphériques, l'ensemble des terrains vacants, des terrains ouverts et des terrains agricoles sont mis à la disposition des développeurs urbains. Pour les zones périphériques (zones 303, 306, 308, 310, 312, 317, 319, 320, 322), ouvertes sur l'hinterland de Bangalore, les terrains mis à la disposition des développeurs urbains sont infinis.

b) Les politiques d'investissement dans les infrastructures de transport :

Le programme d'investissement dans les infrastructures de transport comporte la construction de l'Inner Ring Road (120 km-voie, 1.202.000.000 INR, soit 22.044.026 euros) et la construction en

2008 de neuf lignes de BRT. Ces neufs lignes sont situées sur les artères radio-centriques principales de Bangalore, soit 216,8 km-corridor (51.587.000.000 INR, soit 946.077.529 euros)[143].

L'investissement total sur les 20 années de simulation est de 52.789.000.000 INR, soit 969.497.431 euros.

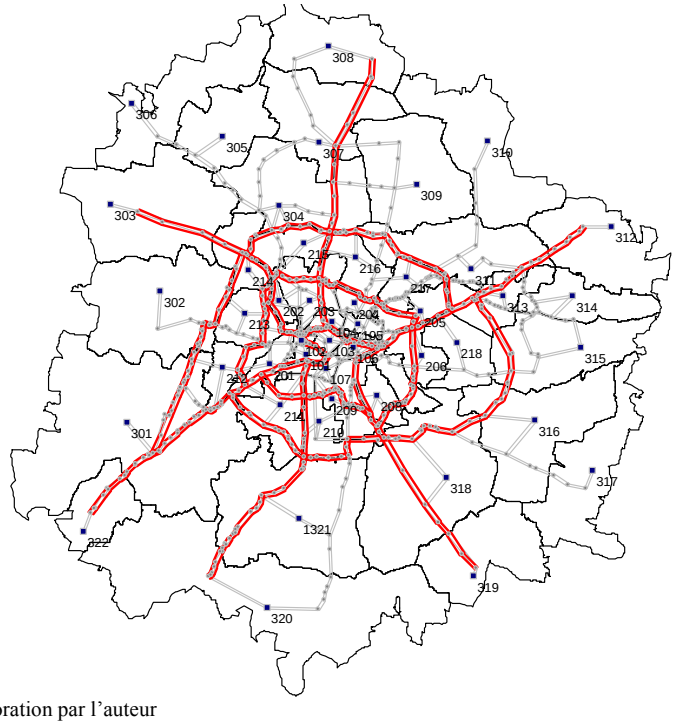
Par rapport au budget prévu pour le projet métro, la municipalité fait une économie de 10.000.000.000 INR (183.655.199 euros) qui peut être consacré au financement de l'achat du matériel roulant, ou au financement du coût incrémental d'une option technologique plus environnementale comme des bus électrique ou des bus CNG. Généralement les BRT fonctionne dans le cadre de partenariat public privé où l'achat des bus est à la charge des opérateurs privés.

Les corridors BRT étant construits sur les routes existantes (partage de la voirie), l'équivalent d'une voie est retiré à la capacité de la route.

c) Les politiques de prix :

L'accessibilité aux véhicules particuliers est légèrement augmentée à chaque période de temps pour les catégories riches – quintiles IV et V – en diminuant les facteurs de pénalisation affectant la désutilité de l'automobile et de la moto. Cette augmentation de l'accessibilité représente la croissance du taux de motorisation mais n'impose pas directement un usage plus important des véhicules particuliers. Leurs usages dépendent des avantages – directs et indirects – qu'ils offrent, relativement aux autres solutions de transports.

Carte 44 : Représentation dans TRANUS des neuf lignes de BRT (en rouge).



Source : Elaboration par l'auteur

6) Scénario « BRT+ »

Ce scénario que l'on pourrait qualifier de « scénario Curitiba » simule l'impact d'un BRT associé à un urbanisme de dualisation urbaine et une politique de prix. C'est le scénario de l'intégration entre les trois leviers d'action de politique urbaine disponibles.

[143] Sur la base du BRT de Bogota, soit 238 millions INR / Km. Ce coût comprend la construction des infrastructures BRT (corridors, stations,…) ainsi que l'aménagement de la voierie destinée au trafic mixte (macadam, trottoir, …).

Ce scénario « BRT+ » associe le projet «IT-corridor», la construction d'un BRT et des politiques prix de lutte contre l'usage des véhicules particuliers. Plus précisément, il fait du projet «IT-corridor» une politique intégrée de développement urbain orienté par un BRT (Transit Oriented Development). Le modèle urbain imaginé est une bicéphalisation du développement urbain : «IT corridor – BRT – Ville traditionnelle».

Construction TRANUS : scénario « BRT+ »

Nous le traduisons dans TRANUS par :

a) Les politiques d'usage des sols : orientation du développement urbain vers les zones desservies par le BRT, densification du centre ville et concentration du développement urbain sur l'IT-corridor et les zones de la première couronne situées entre le centre ville et l'IT-corridor. Endiguement de l'étalement urbain dans la couronne périphérique.

b) Le programme d'investissement dans les infrastructures de transport : construction de l'Inner Ring Road (IRR) et de onze lignes de BRT.

c) Et les politiques de prix : lutte contre l'usage des véhicules particuliers.

Plus précisément :

a) Les politiques d'usage des sols :

Dans le centre ville (les zones 100') : la totalité des terrains vacants sont mis à disposition des développeurs urbains sous forme de sols mixtes – qui permet de plus grande densité. Les terrains industriels sont progressivement (5% par an) convertis en sols mixtes.

Dans la première couronne (les zones 200') : la moitié des terrains vacants sont mis à disposition des développeurs urbains, sauf dans les zones situées entre le centre ville et l'IT-corridor (206, 208, 218) où la totalité des terrains vacants est mise à disposition.

Dans la deuxième couronne (les zones 300') : Aucune nouvelle terre n'est autorisée à l'urbanisation. Les terrains résidentiels sont progressivement convertis en sols industriels – dans des quantités équilibrant les conversions inverses du centre ville.

Dans l'IT-corridor (zones 313, 314, 315, 316, 318) l'ensemble des terrains vacants, des terrains ouverts et des terrains agricoles sont mis à la disposition des développeurs urbains. De la totalité des terrains – les 140 km^2 du projet IT-corridor préparé par JURONG -, 45% est offert sous forme de sol mixte, 45% de sol résidentiel, 10% de sol industriel. Les facteurs d'attractions sont augmentés pour les secteurs des quintiles IV et V, les emplois IT et gouvernementaux ; ils sont diminués pour les quintiles I et II, et les emplois de industrie traditionnelle.

b) Les politiques d'investissement dans les infrastructures de transport :

Le programme d'investissement dans les infrastructures de transport comporte la construction de l'Inner Ring Road (120 km-voie, 1.202.000.000 INR, soit 22.047.819 euros) et la construction en 2008 de onze lignes de BRT.

A l'inverse du scénario « BRT- », les lignes de Bus Rapid Transit ne couvrent pas l'ensemble du territoire de façon homogène mais sont concentrés sur 1) le centre ville, 2) un corridor «Technologies de l'Information» situé dans un croissant Est – Sud/Est, 3) entre le centre ville et le corridor TI, et 4) sur les axes radio-centriques principaux de l'agglomération. Nous observons que l'évolution de la distribution spatiale des résidences est très hétérogène. Ces onze lignes sont situées deux sur l'IRR, quatre dans le sud, l'ouest et le nord du centre ville (Zone 100) sur les artères radio-centriques principales, trois sur les artères radio-centriques sortant du centre ville en direction de l'IT-corridor, et deux au sein de l'IT-corridor, soit 135 km-corridor (32.130.000.000 INR, soit 589.255.230 euros)[144].

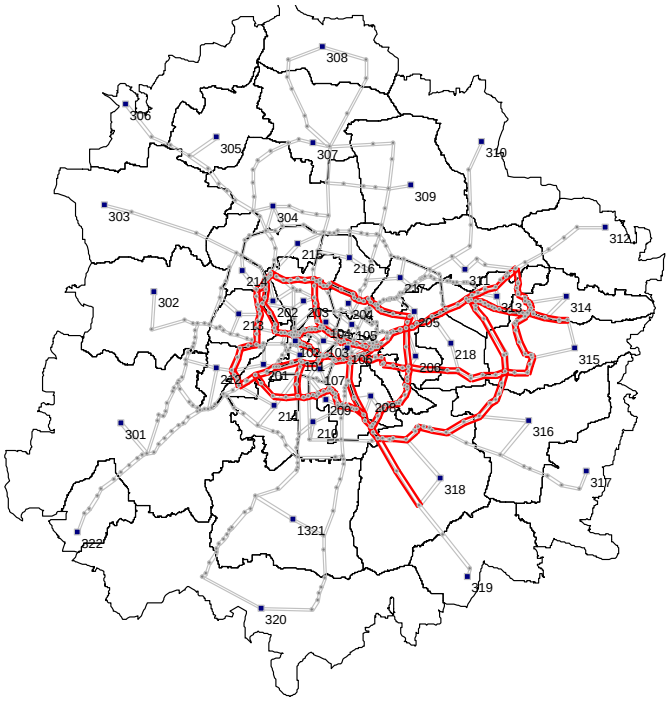
L'investissement total sur les 20 années de simulation est de 33.332.000.000 INR (611.299.575 euros).

c) Les politiques de prix :

[144] Sur la base du BRT de Bogota, soit 238 millions INR / Km. Ce coût comprend la construction des infrastructures BRT (corridors, stations,…) ainsi que l'aménagement de la voierie destinée au trafic mixte (macadam, trottoir, …).

Les facteurs de pénalisation affectant la désutilité de l'automobile et de la moto sont maintenus constants. Les coûts d'opération des véhicules particuliers sont augmentés sous la forme d'une taxe de 100% sur les carburants. Un coût de parking est appliqué dans le centre ville et la première couronne, respectivement l'équivalent de 30 et 15 minutes de la valeur moyenne du temps des quintiles IV et V.

Carte 45 : Représentation dans TRANUS des onze lignes de BRT (en rouge).



Source : Elaboration par l'auteur

D - *Les hypothèses*

Dans tous ces scénarii, nous testons les politiques urbaines – politique des transports, réglementation des usages des sols et politique de prix – «toutes choses égales par ailleurs».

Nous faisons l'hypothèse que la structure économique et sociale de la ville n'est pas modifiée :

1) Les rapports entre la population active et la population totale d'une part et entre la population estudiantine et la population totale d'autre part restent constants :
   - La population active représente 45% de la population totale (Census, 2001)
   - La population estudiantine représente 15% de la population totale (Census, 2001)

2) Les rapports input/output des différentes activités – basiques et induites – restent constants.

Tableau 56 : Consommation des différents quintiles de population par les activités basiques et induites

	Quintile I	Quintile II	Quintile III	Quintile VI	Quintile V
Industries Traditionnelles	20%	30%	30%	30%	30%
Industries T.I.	5%	10%	30%	30%	25%
Administrations	10%	25%	35%	20%	10%
Services	20%	20%	20%	20%	20%
Education	20%	20%	20%	20%	20%

Source : Elaboration par l'auteur, estimations basées sur des interviews auprès des experts.

Tableau 57 : Taux de génération de population par les différentes activités

Nombre d'habitants (appartenant à chaque quintile et au total) généré par un emploi dans les différentes catégories d'activités (basiques et induites)[145].

	Quintile I	Quintile II	Quintile III	Quintile VI	Quintile V	Total
Industries Traditionnelles	0,391	0,489	0,416	0,164	0,180	1,639
Industries T.I.	0,098	0,163	0,416	0,493	0,451	1,619
Administrations	0,195	0,407	0,485	0,328	0,180	1,596
Services	0,391	0,326	0,277	0,328	0,360	1,682
Education	0,391	0,326	0,277	0,328	0,360	1,682

Source : Elaboration par l'auteur

3) Les revenus des différents quintiles de population n'évoluent pas. Nous supposons par là une stabilité des inégalités de revenus entre les différentes classes de population.

Tableau 58 : Salaire annuel des différents quintiles de population

	Quintile I	Quintile II	Quintile III	Quintile IV	Quintile V
Salaire annuel du ménage (INR 2001)	31.056	68.894	110.492	178.151	422.409

Source : SCE-CREOCEAN, 2004

4) La répartition des travailleurs entre les différentes catégories d'emplois (en pourcentage des emplois totaux) reste constante.

Tableau 59 : Répartition des emplois entre les activités

	% des emplois totaux*
Industries Traditionnelles	13%
Industries T.I.	16%
Administrations	16%
Services	55%

Source : census 2001

5) Enfin nous faisons l'hypothèse d'une croissance démographique identique dans tous les scénarios. Nous reprenons les prévisions de croissance démographique adoptées par SCE-CREOCEAN pour l'élaboration du plan d'urbanisme.

[145] Ce tableau se lit comme suit : « 1 emploi dans l'industrie traditionnelle génère 0,391 habitant appartenant au premier quintile de population, 0,489 habitant appartenant au deuxième quintile de population, 0,416 habitant appartenant au troisième quintile de population, 0,164 habitant appartenant au quatrième quintile de population et 0,180 habitant appartenant au cinquième quintile de population, soit 1,639 habitant au total ». Ainsi un emploi dans les services génère plus de citadins qu'un emploi dans les industries T.I..

Tableau 60 : Croissance démographique identique pour les différents scénarios

Année	Taux de croissance annuelle sur la période (%)	Population totale (habitants)
2003		6.145.240
2008	3,25	7.210.985
2013	2,69	8.234.361
2018	2,38	9.262.016
2023	2	10.226.015

Source : SCE-CREOCEAN, 2004

Des hypothèses précédentes découlent l'identique croissance du nombre d'étudiants et d'emplois des différentes catégories d'activités pour tous les scénarios simulés.

Tableau 61 : Evolution de la population étudiante et des emplois par catégories (valeur absolue et taux de croissance annuel)

	2003	2008		2013		2018		2023	
Etudiants	925.470	1.085.957	3,5%	1.240.091	2,8%	1.394.855	2,5%	1.540.033	2,1%
Emplois totaux	2.776.518	3.257.998	3,5%	3.720.417	2,8%	4.184.728	2,5%	4.620.277	2,1%
Emplois dans les Industries traditionnelles	364.334	427.513	3,5%	488.191	2,8%	549.117	2,5%	606.270	2,1%
Emplois dans les T.I.	444.348	521.400	3,5%	595.404	2,8%	669.710	2,5%	739.414	2,1%
Emplois dans l'administration	440.239	516.577	3,5%	589.896	2,8%	663.516	2,5%	732.575	2,1%
Emplois dans les services	1.527.605	1.792.501	3,5%	2.046.917	2,8%	2.302.374	2,5%	2.542.008	2,1%

Source : Elaboration par l'auteur

Notre étude ne fut pas intégrée au processus de décision politique local. Aussi, restant dans un cadre de recherche appliquée, nous avons cherché à isoler la problématique traitée dans la thèse. C'est ce qui explique les simplifications présentées ici. Nous n'avons pas simulé les diverses évolutions possibles de la structure économique et sociale de Bangalore : déclin de l'industrie traditionnelle, croissance ou au contraire ralentissement des activités TI, évolution de la pyramide des âges, accroissement du travail des femmes, accroissement des inégalités, etc.

IV - Analyse des résultats de l'application de TRANUS-SETU à Bangalore

Les résultats des différents scenarii sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 62 : Résultats de l'application de TRANUS-SETU à Bangalore

Scénario	Mobilité* (nombre de déplacements totaux)	Distance moyenne (km)*	Temps moyen (H décimale)*	Part modale transport privé motorisé	Consommation énergétique (L)	Emission CO_2 (Kg)
Année de base	664.553	12,66	1,13	45%	853.151	2.120.598
BAU	+65%	13,66	1,27	43%	+70%	+70%
ROUTE	+68%	13,79	0,94	50%	+99%	+99%
METRO-	+61%	13,08	1,63	36%	+51%	+51%
BRT-	+51%	14,82	1,30	35%	+54%	+54%
METRO+	+59%	12,19	1,23	23%	+4%	+4%
BRT+	+48%	14,68	1,66	12%	-6% (-4%)**	-6% (-4%)**

* Seuls les déplacements inter-zones sont pris en compte. Les déplacements intra-zones ne sont pas comptabilisés dans les calculs de mobilité, temps moyen et distance moyenne.

** -6% correspond à un BRT fonctionnant à l'(hydro)-électricité comme à Quito, Equateur / (-4%) correspond à un BRT fonctionnant au diesel comme à Bogota, Colombie.

Source : Elaboration par l'auteur

A - *Evolution des consommations énergétiques selon différents scénarios de politiques urbaines*

Les Signatures Energétiques des Transports Urbains (SETU) tracent l'évolution sur 20 ans des consommations énergétiques liées aux transports urbains selon différentes combinaisons d'actions sur le couple « transport – usage des sols ».

Nous observons sur le graphique 73 que les signatures énergétiques se différencient selon trois groupes :

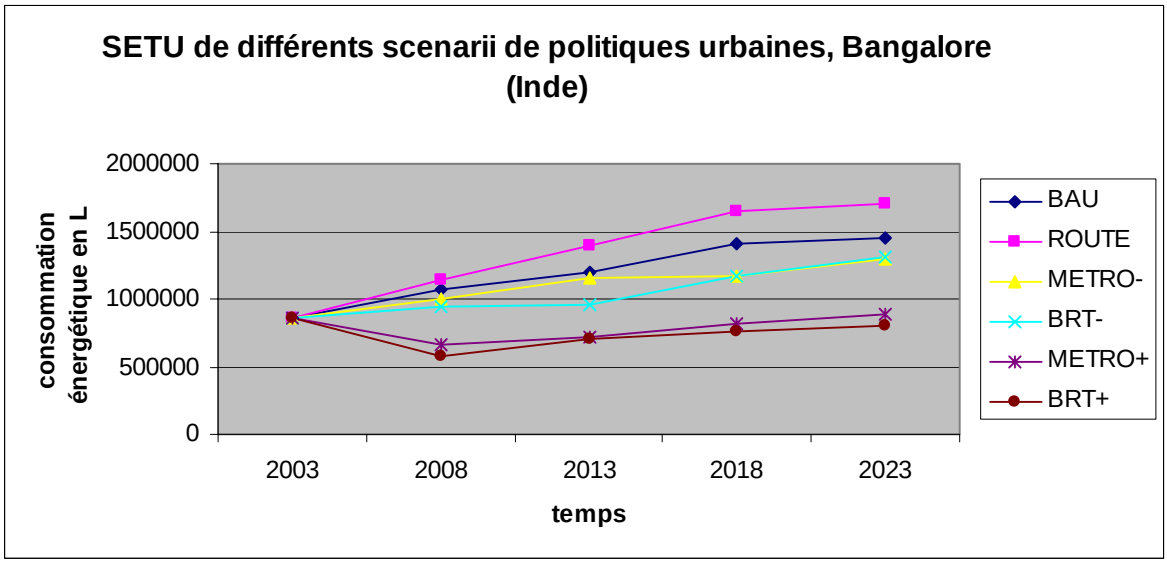
1) Les deux SETU engendrées par les scénarios « BAU » et « ROUTE », c'est-à-dire sans politique d'usage des sols ni politique de prix visant la réduction des consommations énergétiques, et avec des investissements dans les infrastructures de transport limités au réseau routier. Ces deux SETU occupent le haut du graphique et sont relativement parallèles. Elles sont les plus dommageables pour l'environnement. La croissance de la SETU du scénario « ROUTE » est significativement plus forte que celle de la SETU du scénario « BAU ». Les deux SETU connaissent un ralentissement de leur croissance durant la dernière période, 2018-2023. Ce ralentissement comparable dans les deux scénarios n'est pas caractérisé par l'inversion d'une des composantes de la chaîne de causalité « politique urbaine – structure urbaine – consommations énergétiques ». Tous les chaînons (nombre de déplacements, distribution modale, durée et distance moyenne des déplacements, etc.) continuent à

évoluer dans la même direction que lors des périodes précédentes. Ils évoluent simplement moins rapidement. Les SETU des scénarios « BAU » et « ROUTE » tracent donc la signature énergétique d'une transition structurelle dans l'organisation de l'espace urbain : les plateaux observés en dernière période indiquent la mise en place progressive d'un nouvel équilibre dans la distribution spatiale des activités et ménages, dans la distribution modale et spatiale des déplacements, et donc dans la structure urbaine de Bangalore.

2) Les deux SETU engendrées par les scénarios « METRO- » et « BRT- », c'est-à-dire avec des investissements importants dans des infrastructures de transport en commun, un métro ou un Bus Rapid Transit, mais sans intégration de cette politique transport avec des politiques de prix et d'usage des sols. Ces deux SETU sont intermédiaires entre les scénarios très énergétivores du premier groupe et ceux stabilisant les consommations d'énergie et les émissions de CO_2. Elles présentent toutefois une croissance significative des consommations d'énergie. Ces deux SETU ont des trajectoires relativement parallèles sur l'ensemble de la simulation. Elle connaissent toutes les deux une croissance moyenne sur les trois premières périodes, entrecoupée par une phase de stabilisation des consommations énergétiques (en deuxième période pour le scénario « BRT- », en troisième période pour le scénario « METRO- »), puis une augmentation plus faible en quatrième période. Le décalage temporel de la phase de stabilisation s'explique par l'effet plus fort de l'important réseau de BRT (11lignes de BRT desservant l'ensemble de l'agglomération contre 2 lignes de métro ayant une aire de chalandise limitée) engendrant une réaction plus rapide de la structure urbaine.

3) Les deux SETU engendrées par les scénarios « METRO+ » et « BRT+ », c'est-à-dire avec des investissements importants dans des infrastructures de transport en commun, un métro ou un Bus Rapid Transit, mais cette fois ces investissements sont intégrés à des politiques de prix et d'usage des sols visant à renforcer les effets positifs et à contrecarrer les effets négatifs des infrastructures lourdes de transport en commun. Ces deux SETU occupent le bas du graphique et sont relativement superposées. Elles tracent les scénarios économes en énergie sur les 20 années de simulation. Après une forte diminution des consommations énergétiques (-23% en cinq ans pour la SETU « METRO+ » et -32% en cinq ans pour la SETU « BRT+ ») lors de la première période (2003-2008) correspondant à la phase d'implémentation des politiques intégrées « transport – usage des sols », les SETU de ces deux scénarios présentent des trajectoires à nouveau croissante mais avec des taux de croissance moindres relativement aux autres scénarios. Cette différence entre une forte diminution des consommations énergétiques en première période et une faible augmentation durant les périodes suivantes est liée au caractère « one shot » des scénarios simulés : l'investissement dans les infrastructures de transport se fait en une seule fois, lors de la première période.

Graphe 73 : SETU des différents scénarii de politiques urbaine, Bangalore



Source : Elaboration par l'auteur

Tableau 63 : Taux de croissance annuels des SETU des différents scénarios de politiques urbaines

	2003 - 2008	2008 - 2013	2013 - 2018	2018 - 2023
BAU	4,5%	2,3%	3,4%	0,6%
ROUTE	6%	4%	3,4%	0,7%
METRO-	3,1%	3%	0,4%	1,9%
BRT-	2,2%	0,1%	4,1%	2,3%
METRO+	-4,9%	1,6%	2,6%	1,6%
BRT+	-7,3%	3,7%	1,7%	0,9%

Source : Elaboration par l'auteur

B - *Evolution de la structure urbaine selon différents scénarios de politiques urbaines*

Nous allons maintenant analyser

i) l'évolution de la structure urbaine caractérisée par la localisation spatiale des résidences et des emplois ainsi que par la croissance de la consommation foncière (cf. cartes ci-dessous) et les prix du foncier résidentiel, mixte et industriel,

ii) l'impact de cette structuration urbaine sur la mobilité inter-zone caractérisée par la distance et le temps moyen ainsi que la répartition modale des déplacements.

Cette analyse nous permettra de comprendre le contraste entre ces Signatures Energétiques des Transports Urbains contrastées sur 20 ans et donc d'établir la chaîne de causalité entre les politiques urbaines simulées et les SETU obtenues.

Pour faciliter l'analyse, nous illustrons avec une série de carte les évolutions de la structure urbaine générées par les différentes combinaisons de politiques urbaines. Nous avons produit trois cartes pour chaque scénario :

1) une carte représentant l'évolution spatiale des résidences : plus le rouge est foncé plus la croissance de la population résidant dans cette zone est importante ; inversement plus le bleu est foncé plus la perte de population résidant dans cette zone est grande.

2) une carte représentant l'évolution de la distribution spatiale des emplois : plus le vert est foncé plus la croissance du nombre d'emplois dans cette zone est importante.

3) une carte représentant la consommation foncière, paramètre choisi pour signifier les phénomènes d'étalement ou de condensation urbaine : plus le vert puis le rouge est foncé plus la consommation de foncier dans cette zone croît ; inversement plus le bleu est foncé plus la consommation de foncier dans cette zone décroît.

Ces cartes (les cartes sont présentées ci-dessous) ont été effectuées avec le logiciel MapInfo de Système d'Information Géographique (S.I.G.). Elles traduisent la transparence de la chaîne de causalité conduisant des politiques urbaines simulées aux consommations énergétiques dans TRANUS-SETU.

Pour décrire ces phénomènes, nous reprenons les termes utilisés précédemment lors de la présentation de la structure urbaine actuelle de Bangalore.

Tableau 64 : Evolutions des prix fonciers selon différents scénarii de politiques urbaines

	BAU	ROUTE	METRO-	BRT-	METRO+	BRT+
Sol Résidentiel						
Centre ville	+89%	+74%	+76%	+105%	+103%	+9%
1ère couronne	+84%	+79%	+70%	+62%	+99%	-6%
2ème couronne	+3%	0%	0%	+4%	+122%	+92%
Sol Mixte						
Centre ville	+81%	+74%	+81%	+86%	+84%	+59%
1ère couronne	+38%	+37%	+36%	+30%	+10%	+8%
2ème couronne	0%	0%	0%	0%	+134%	+115%
Sol Industriel						
Centre ville	+26%	+25%	+81%	+46%	+125%	+26%
1ère couronne	+62%	+69%	+36%	+30%	+223%	+42%
2ème couronne	0%	0%	0%	0%	+314%	+263%

Source : Elaboration par l'auteur

En 20 ans, le nombre de déplacement entre les zones augmente de +65% dans le scénario « BAU », la distance moyenne des déplacements passe de 12,66 km à 13,66 km et le temps moyen passe de 1,13 à 1,27 heure décimale. Cette évolution de la mobilité inter-zone s'explique par une tendance à la périphérisation et dé-densification du centre ville dans la localisation résidentielle alors que la localisation des nouveaux emplois est relativement homogène sur le territoire urbain. La périphérisation des résidences et des emplois et la dé-densification du centre ville induisent une consommation foncière importante en périphérie et un abandon de terrain dans certains espaces urbains centraux. Du fait de cette évolution de la matrice Origine – Destination et de la congestion engendrée, la part modale des transports privés motorisés recule légèrement de 45% à 43%.

Le scénario « ROUTE » simule des politiques « pro-route » fluidifiant au maximum le trafic par l'élargissement des routes et la construction de pont et souterrain aux intersections fortement congestionnées. Ces politiques augmentent considérablement la mobilité entre les zones urbaines (+68%), les distances moyennes (13,79 km) et la part modale des transports privés motorisés (50%). Cette évolution de la mobilité est due à une structuration urbaine caractérisée par l'étalement urbain : une forte périphérisation des résidences et des emplois, une dé-densification du centre ville induisant une consommation foncière importante en périphérie et un abandon de terrain dans certains espaces urbains centraux. Ces évolutions de la structure urbaine se traduisent par une croissance plus faible que dans le scénario « BAU » des prix du foncier résidentiel, mixte et industriel en centre ville et en première couronne. Nous sommes dans un scénario urbain de type « Atlanta » (cf. chapitre 1). Ce scénario connaît en apparence un relatif succès puisque le temps moyen des déplacements inter-zones diminue fortement (0,94H) mais basé sur les véhicules particuliers il est très énergétivore : les consommations énergétiques doublent en 20 ans.

Les scenarii « METRO- » et « BRT- » simulent des investissements importants dans un système de transport de masse, deux lignes de métro lourd – Nord/Sud et Est/Ouest passant par le centre ville - pour le premier et un important réseau de onze lignes de BRT pour le second. Ces politiques d'investissement ne sont intégrées ni à une réglementation des usages des sols ni à une politique des prix.

Nous observons dans le scénario « METRO- » d'une part que la périphérisation des résidences est bien moindre que dans les scénarii « BAU » et « ROUTE » et d'autre part qu'elle est concentrée dans les zones de la première couronne périphérique. La localisation des nouveaux emplois est relativement homogène, même si plus concentrée sur les zones desservies par le métro – au Sud et au Nord-Ouest notamment. Nous notons le regain d'attractivité du centre ville – au croisement des lignes de métro. Ces éléments se traduisent par une moindre consommation foncière en périphérie que dans les scénarii « BAU » et « ROUTE ». Le métro semble avoir pour effet de limiter la périphérisation et

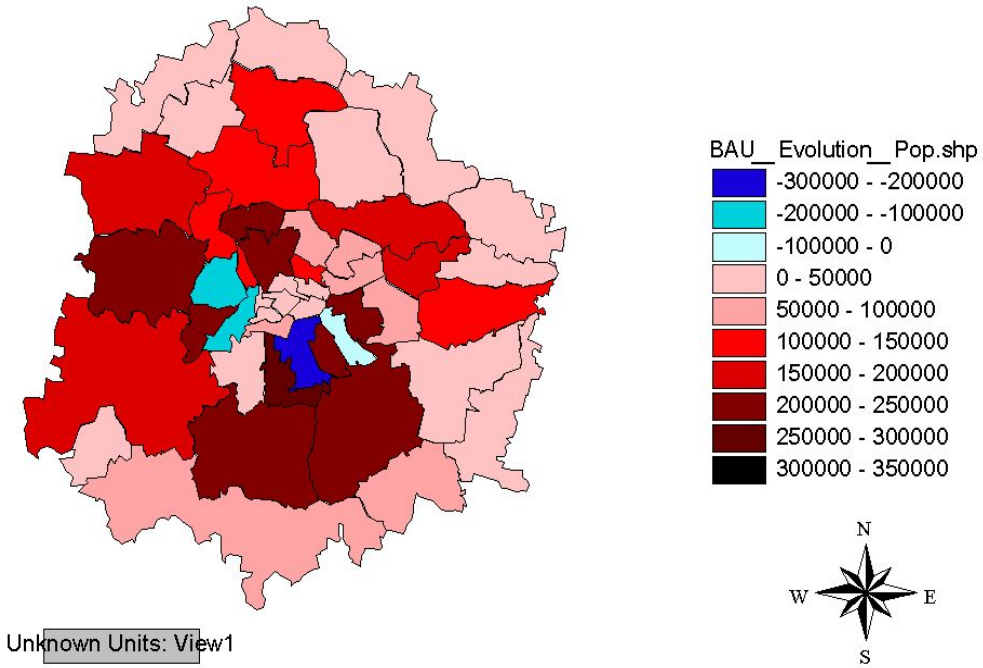
l'étalement urbain et de renforcer le centre ville. Ceci se traduit par une croissance plus faible de la mobilité inter-zone (+61%) et de la distance moyenne (13,08 km), une diminution de la part modale des transports privés motorisés (36%). Par contre, point noir de ce scénario, le temps moyen des trajets augmente fortement (1,63H) ; cela s'explique par la congestion du trafic due au manque d'investissement dans l'infrastructure routière. Ces évolutions de la structure urbaine se traduisent par une croissance des prix du foncier résidentiel, mixte et industriel en centre ville et en première couronne proche des scénarii « BAU » et « ROUTE » et en contraste avec les scénarii « METRO+ », « BRT- » et « BRT+ ».

Le scénario « BRT- » se caractérise par la mise en place d'un important réseau de lignes de Bus Rapid Transit. Ce réseau BRT couvre l'ensemble du territoire urbain. C'est ce qui explique la forte et homogène périphérisation des localisations résidentielles aussi bien en première, deuxième et troisième couronne mais sans dé-densification du centre-ville – contrairement aux scénarii BAU et ROUTE. En effet l'accessibilité et donc l'attractivité du centre se voient renforcer par cet important réseau de transport de masse. Il en est de même pour la distribution spatiale des emplois, même si elle est notoirement plus homogène. Du fait, la consommation foncière est plus périphérique que dans le scénario « METRO- » mais clairement moins que dans les scenarii « BAU » et surtout « ROUTE ». Nous n'observons pas non plus l'abandon de terrain dans les certaines zones centrales comme dans les scénarii « ROUTE » et « BAU ». Cette évolution dans les tendances de structuration urbaine se traduit par une croissance plus faible encore de la mobilité inter-zone (+51%), une très forte augmentation de la distance moyenne (14,82 km), une légère augmentation du temps moyen de déplacement (1,30H)– moindre que les cinq autres scenarii – et une diminution de la part modale des transports privés motorisés (35%). L'importance du réseau de BRT développé – onze lignes couvrant l'ensemble de l'agglomération – supporte les tendances structurelles observées et explique l'augmentation des distances mais aussi de la vitesse et donc la réduction des temps de trajet et de la part modale des véhicules privés. Ces évolutions de la structure urbaine se reflètent parfaitement dans la croissance particulièrement forte des prix du foncier résidentiel, mixte et industriel en centre ville et moindre dans la seconde couronne.

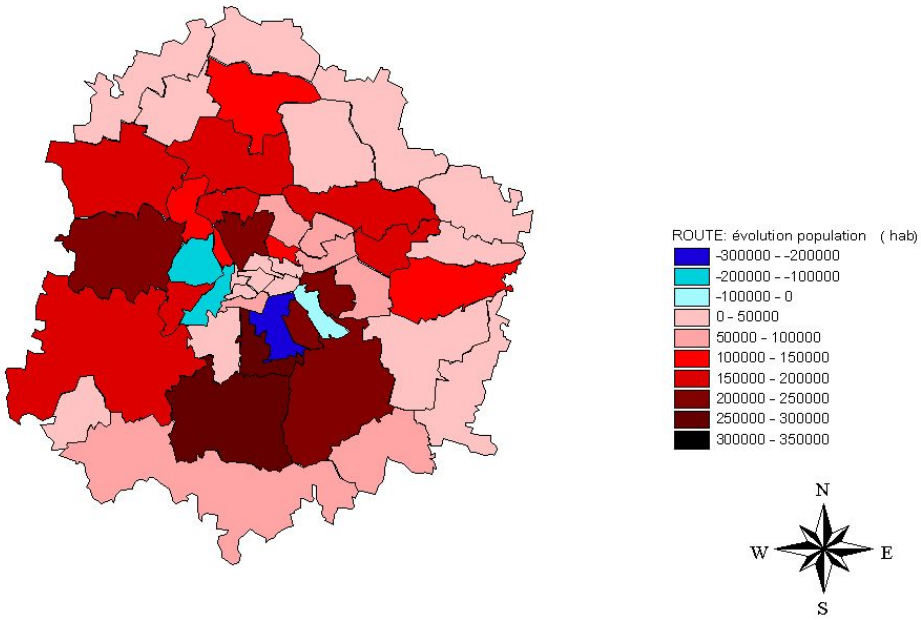
Le scénario « METRO+ » simule des investissements importants dans un système de métro lourd identique à celui du scénario « METRO- » mais intégrés à une réglementation des usages des sols et à une politique des prix. Nous observons des tendances dans la structuration urbaine inverses de celles des scenarii analysés précédemment. La distribution spatiale des résidences et des emplois se concentre dans la première couronne et au Sud de la deuxième couronne. Le centre ville – au croisement des deux lignes de métro – perd toujours des résidences mais cette fois clairement parce que la population est chassée par les emplois. La tendance à la concentration des emplois en centre ville augmente la rente foncière et la population qui ne peut payer quitte le centre pour se loger dans des zones plus périphériques mais desservies par le métro. Ces éléments se traduisent par un abandon de terrain urbain dans les zones extérieures de la troisième couronne. La consommation foncière se concentre dans les zones centrales et de première et deuxième couronne desservies par le métro. Nous observons que cette consommation foncière est relativement faible, ce qui traduit une densification de ces mêmes zones. Ainsi le métro intégré à un urbanisme adapté canalise le développement urbain sur certaines zones. Ces tendances nouvelles dans la structuration urbaine de Bangalore se traduisent par une mobilité inter-zones plus faible que dans les scenarii analysés précédemment (+59%), une diminution de la distance moyenne (12,19 km), une faible croissance du temps moyen des trajets (1,23H) et une très faible part des transports privés motorisés dans la répartition modale des déplacements (23%). Ces évolutions de la structure urbaine se traduisent en centre ville et en première couronne par une forte croissance des prix du foncier résidentiel et industriel, et une croissance plus modérée des prix du foncier mixte. Au contraire des scénarios analysés précédemment, la politique d'endiguement de l'étalement urbain limitant l'offre foncière en périphérie provoque une forte appréciation des terrains de la deuxième couronne, quelque soit leur usage.

Le scénario « BRT+ » simule des investissements importants dans la construction de onze lignes de BRT intégrés à une réglementation des usages des sols et une politique des prix. A l'inverse du scénario « BRT- » les lignes de Bus Rapid Transit ne couvrent pas l'ensemble du territoire de façon homogène mais sont concentrés sur 1) le centre ville, 2) un corridor «Technologies de l'Information» situé dans un croissant Est – Sud/Est, 3) entre le centre ville et le corridor TI, et 4) sur les axes radio-centriques principaux de l'agglomération. Nous observons que l'évolution de la distribution spatiale des résidences est très hétérogène. Les résidences nouvelles se concentrent dans le corridor TI principalement, mais aussi dans les parties Sud et Nord de la première couronne. Les zones autour du corridor TI connaissent une dé-densification résidentielle accentuée. Il en est de même pour l'évolution de la distribution spatiale des emplois : la croissance se localise essentiellement dans le corridor TI, au centre et au Nord/Ouest. Ceci se traduit pas une consommation foncière singulière : elle est forte mais pratiquement limitée au corridor TI. Elle augmente – mais beaucoup plus légèrement – au centre et dans la première couronne. A contrario, beaucoup de zones de la deuxième et troisième couronne connaissent un abandon de terrains urbanisés. Ces tendances structurelles sont les signes de la mise en place d'une ville bicéphale, « Ville traditionnelle – Corridor TI ». Cette bi-céphalisation se traduit par une mobilité inter-zone qui augmente peu (+48%) mais dont la distance et le temps moyens des trajets augmentent considérablement (14,68 km et 1,66H). Cette mobilité inter-zone repose de moins en moins sur les transports privés motorisés dont la part diminue énormément (12%). D'autre part cette bi-céphalisation urbaine se traduit par une très faible croissance des prix du foncier résidentiel, mixte et industriel en centre ville et dans la première couronne. Au contraire la deuxième couronne connaît une forte valorisation foncière, quelque soit l'usage des sols.

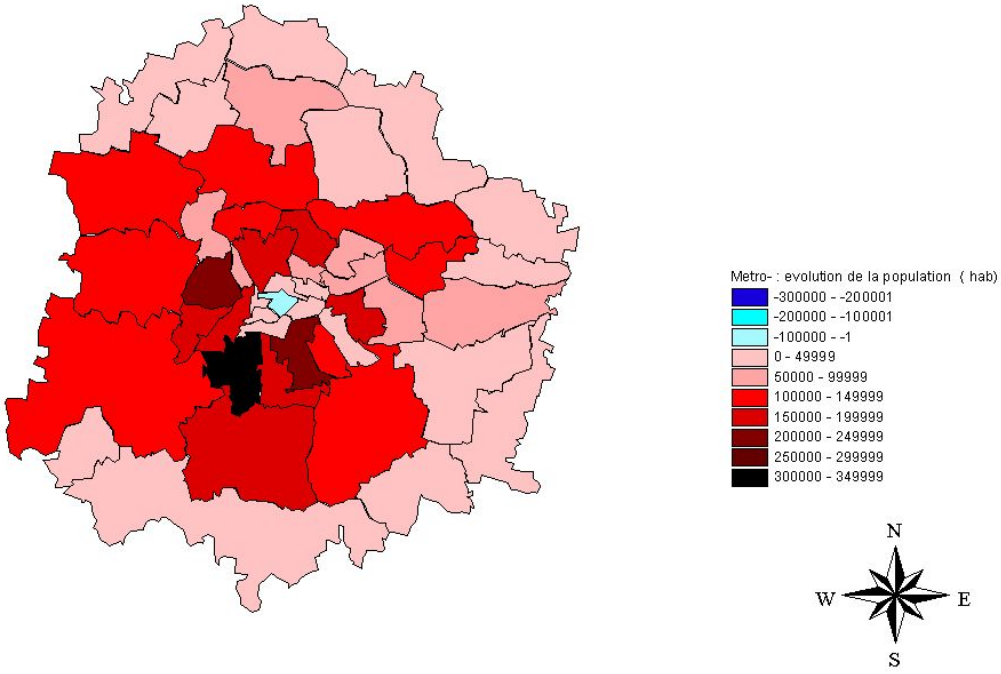
Evolution de la population - scénario BAU



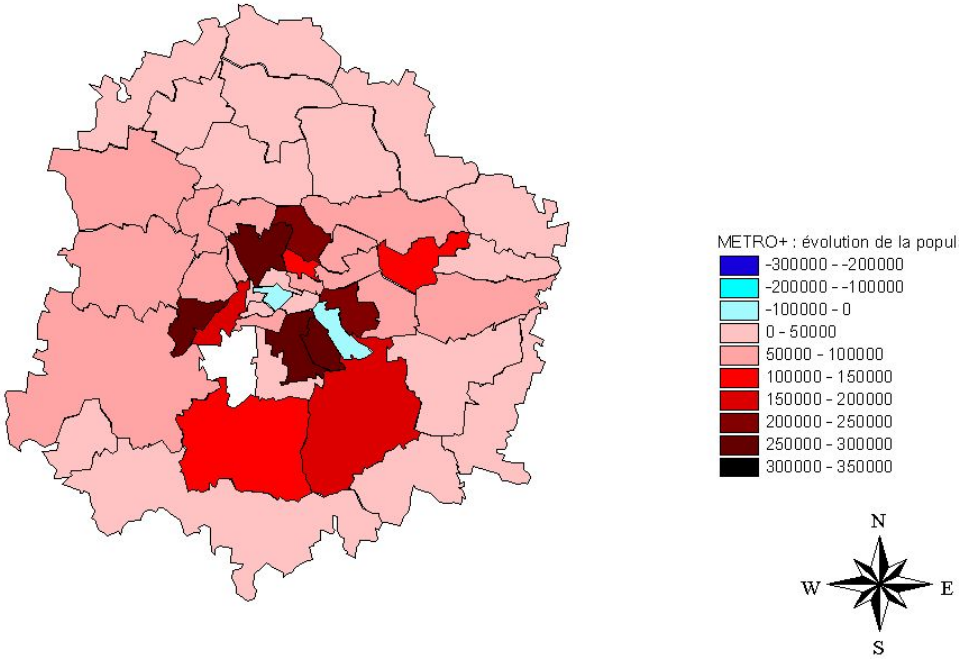
Evolution de la population - scénario ROUTE



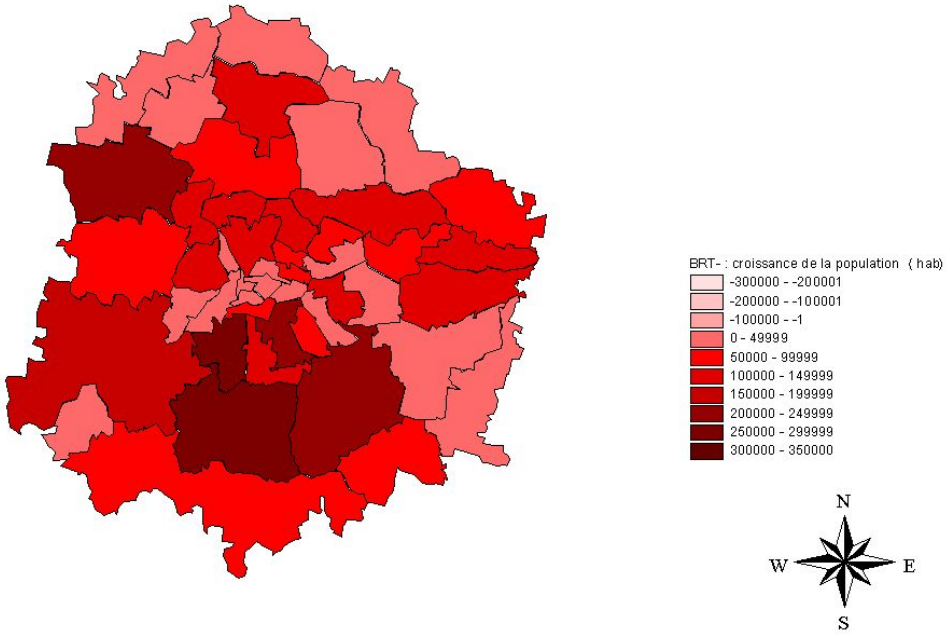
Evolution de la population - scenario Metro-



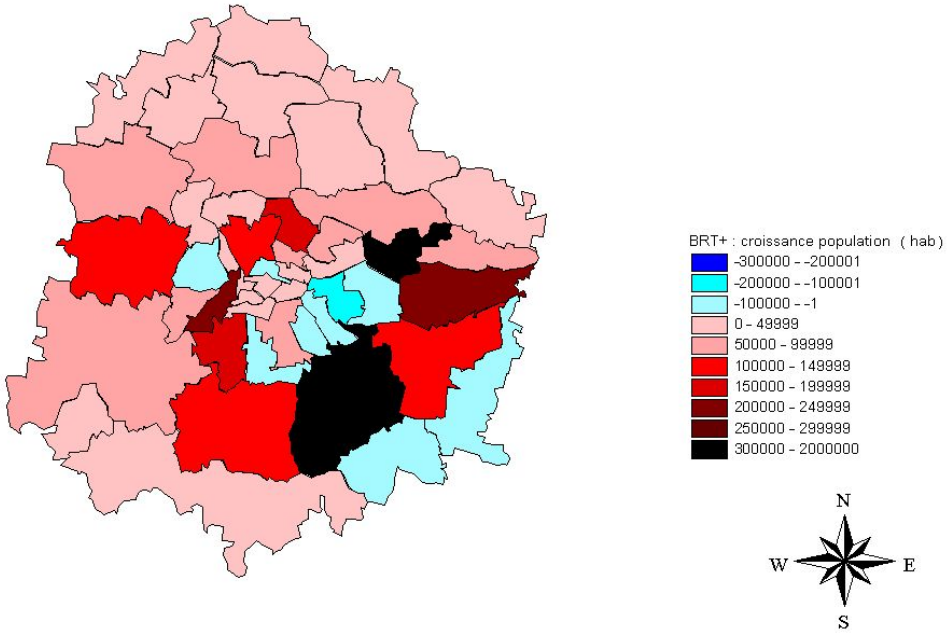
Evolution de la population - scénario METRO+



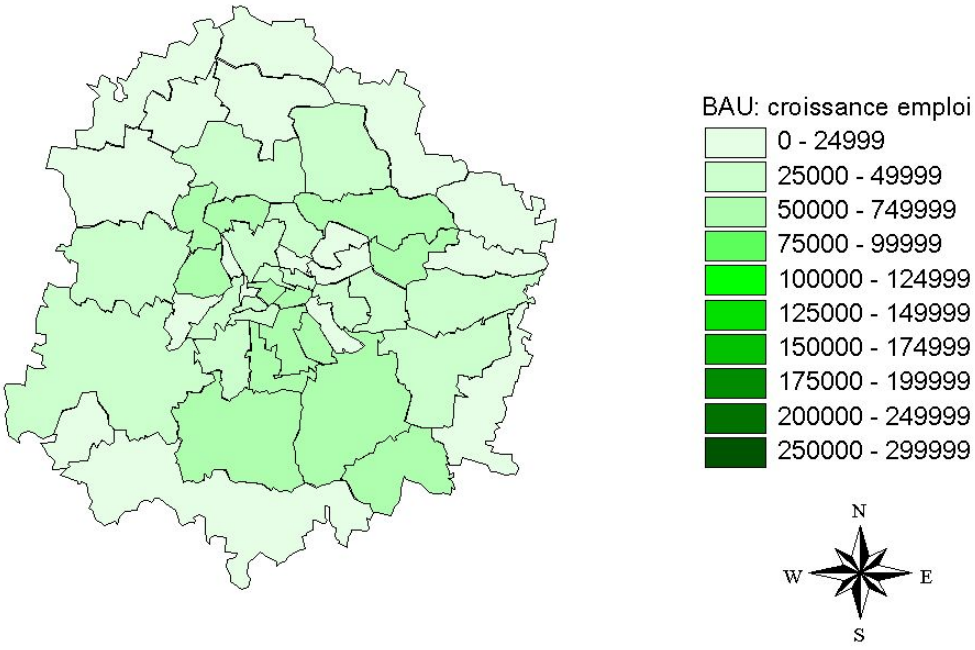
Evolution de la distribution spatial des résidences scénario BRT-



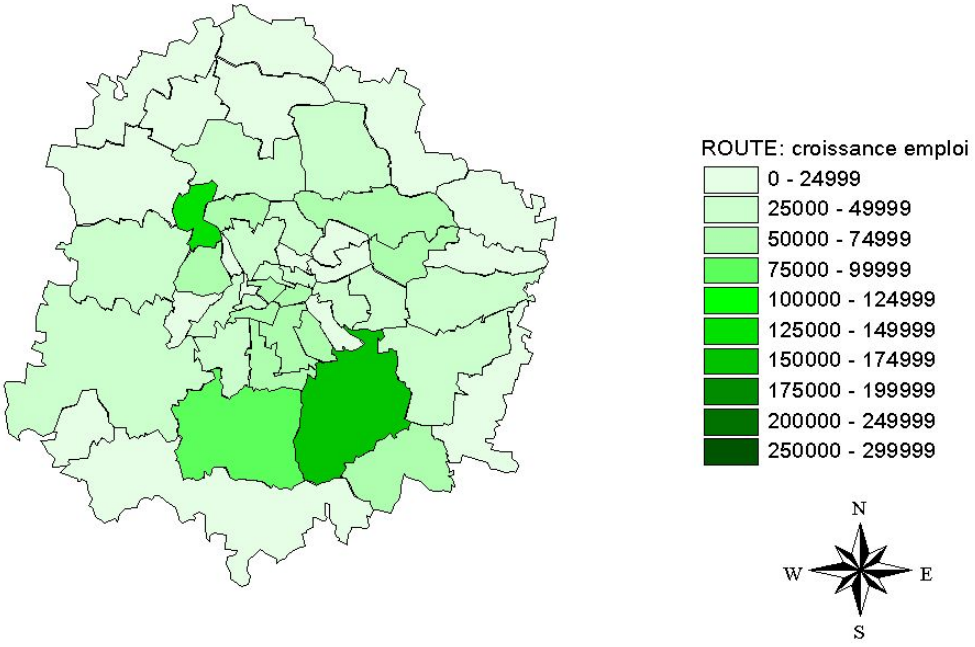
Evolution de la distribution spatiale des résidences scénario BRT+



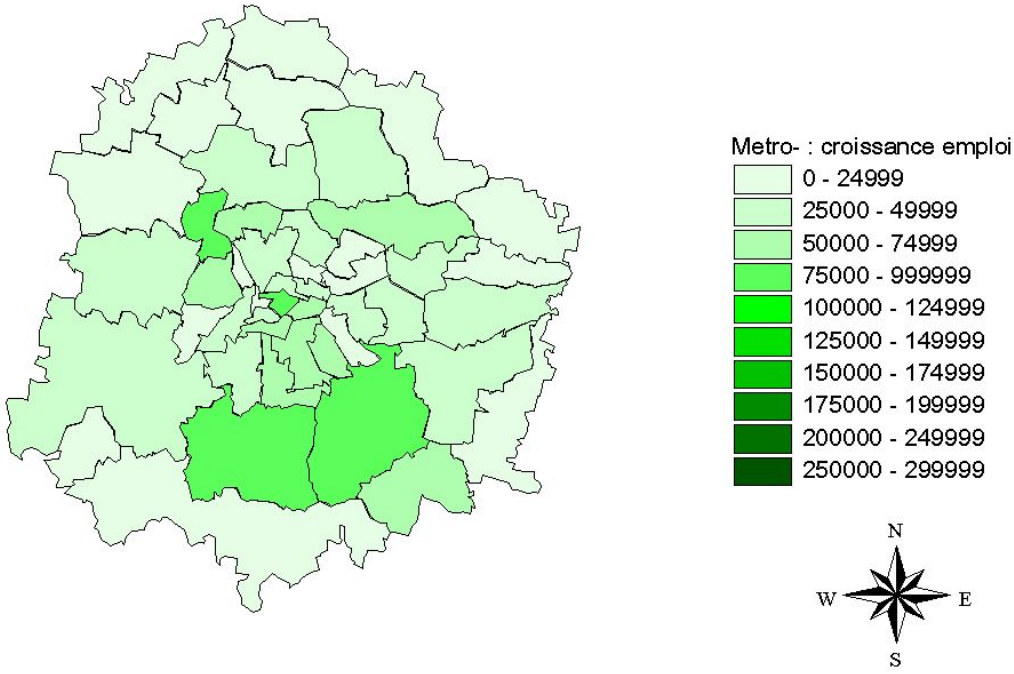
Evolution distribution spatiale des emplois scénario BAU



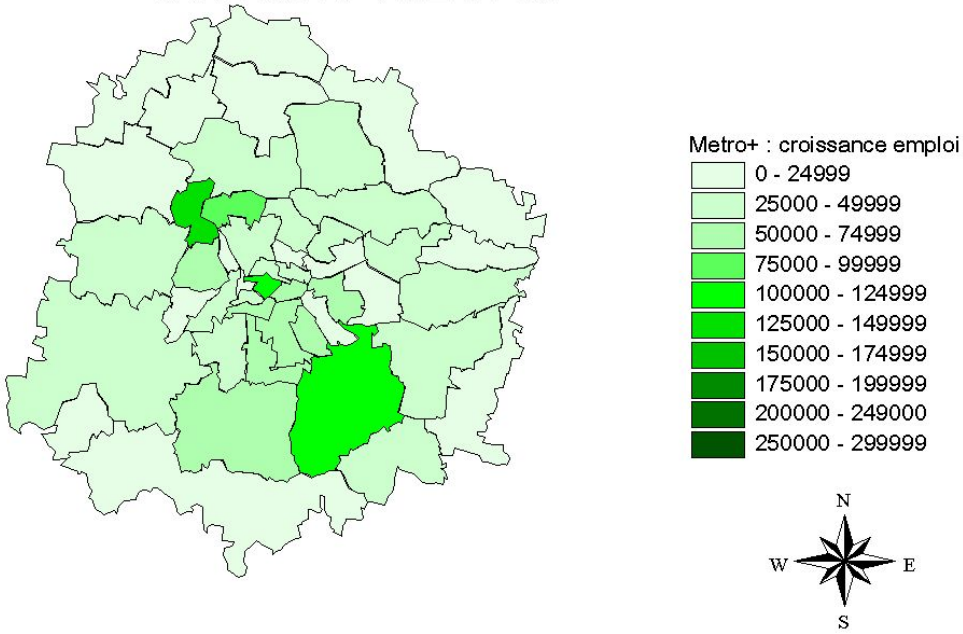
Evolution de la distribution spatiale des emplois scénario ROUTE



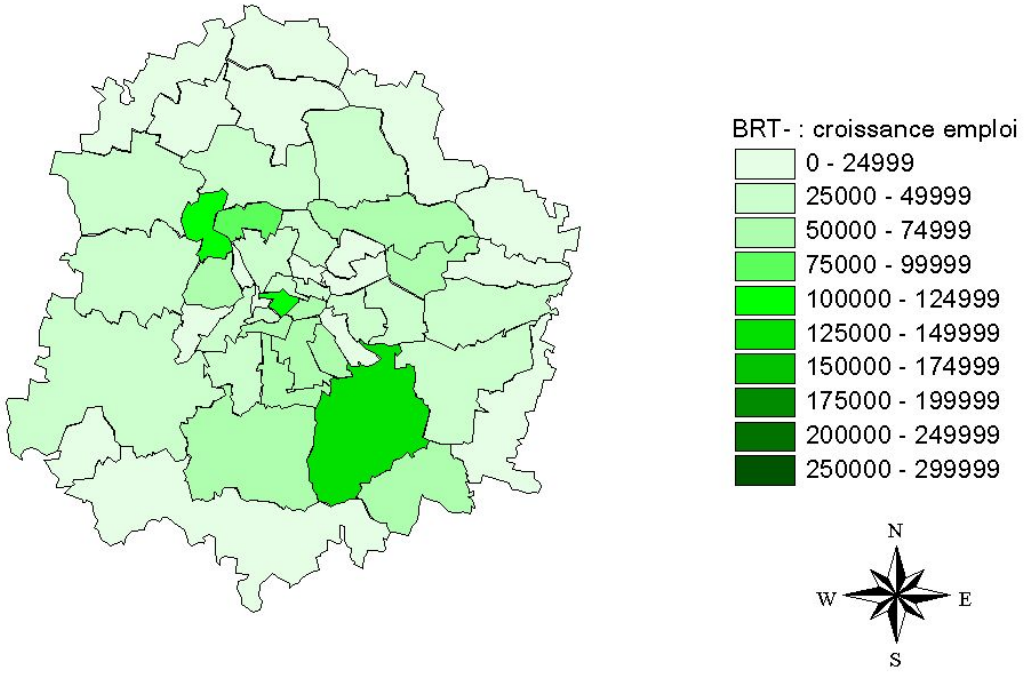
Evolution de la distribution des emplois scénario METRO-



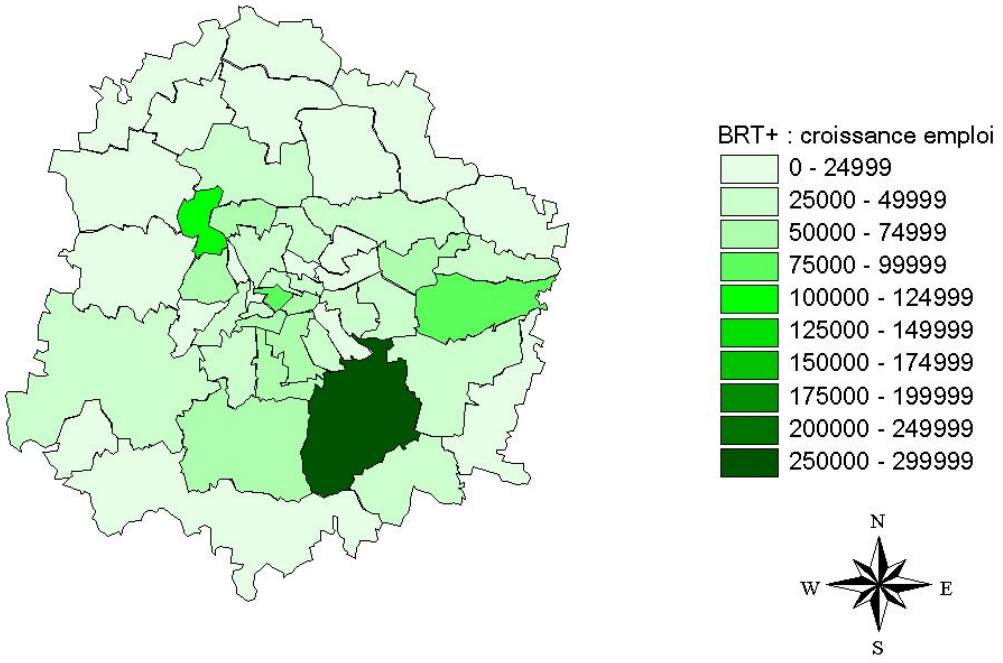
Evolution de la distribution des emplois scénario METRO+



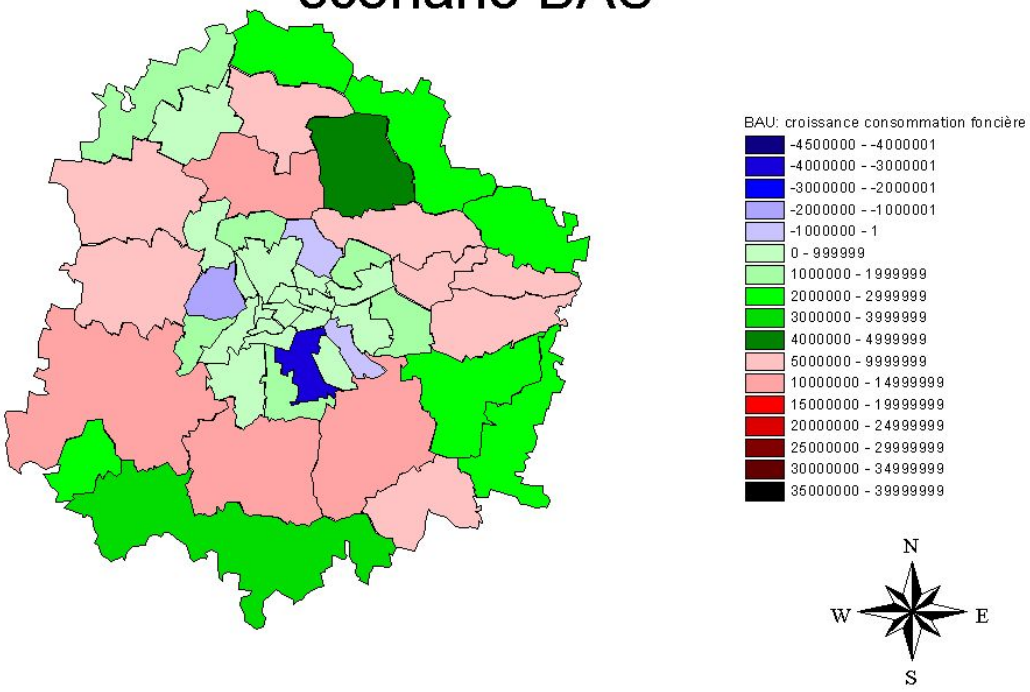
Evolution de la distribution des emplois scénario BRT-



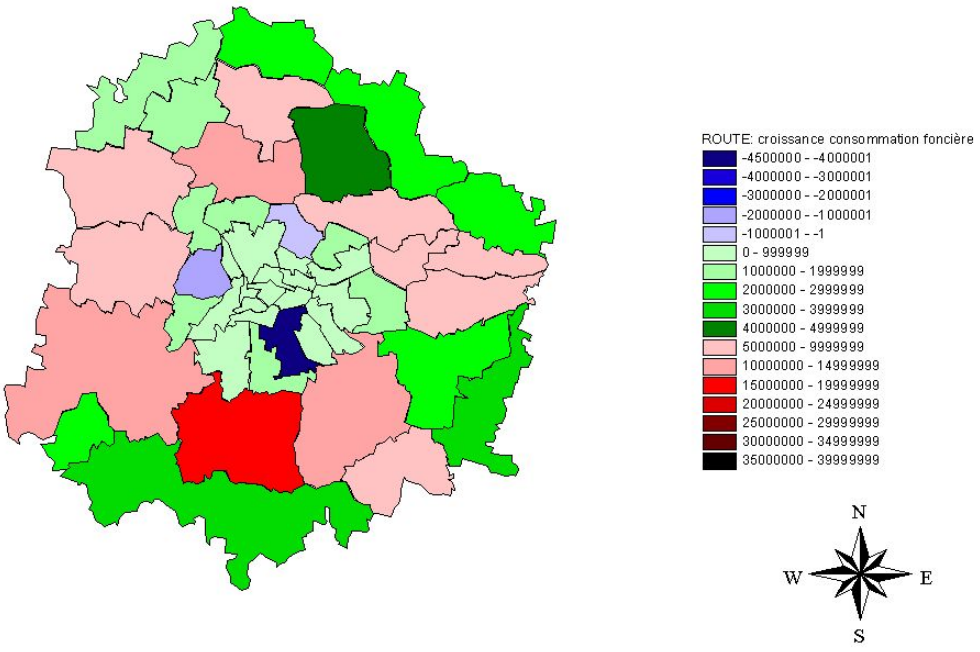
Evolution distribution spatiale des emplois scénario BRT+



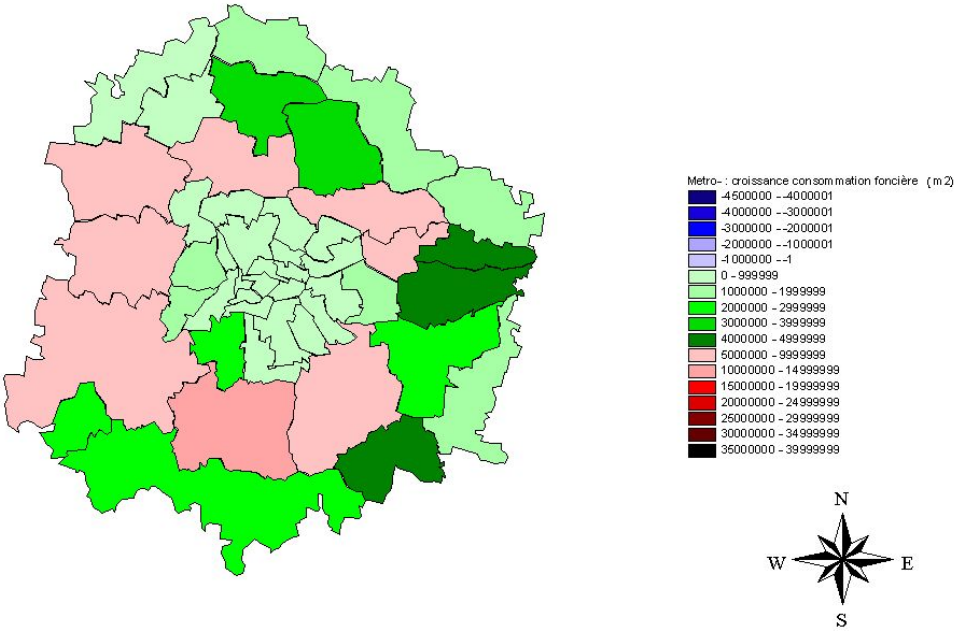
Evolution de la consommation foncière scénario BAU



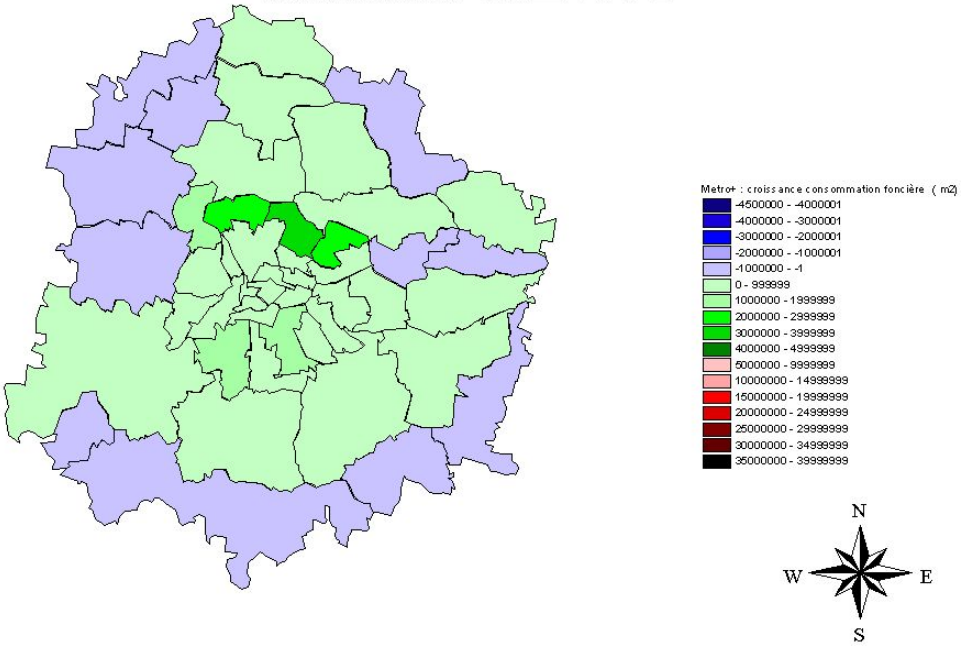
Evolution de la consommation foncière scénario ROUTE



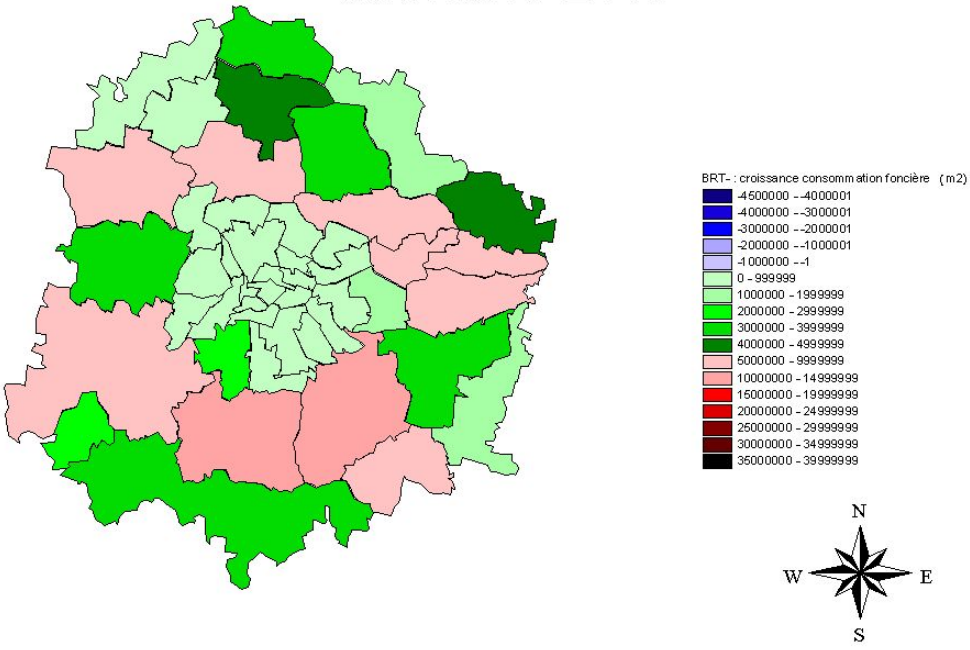
Evolution de la consommation foncière scénario METRO-



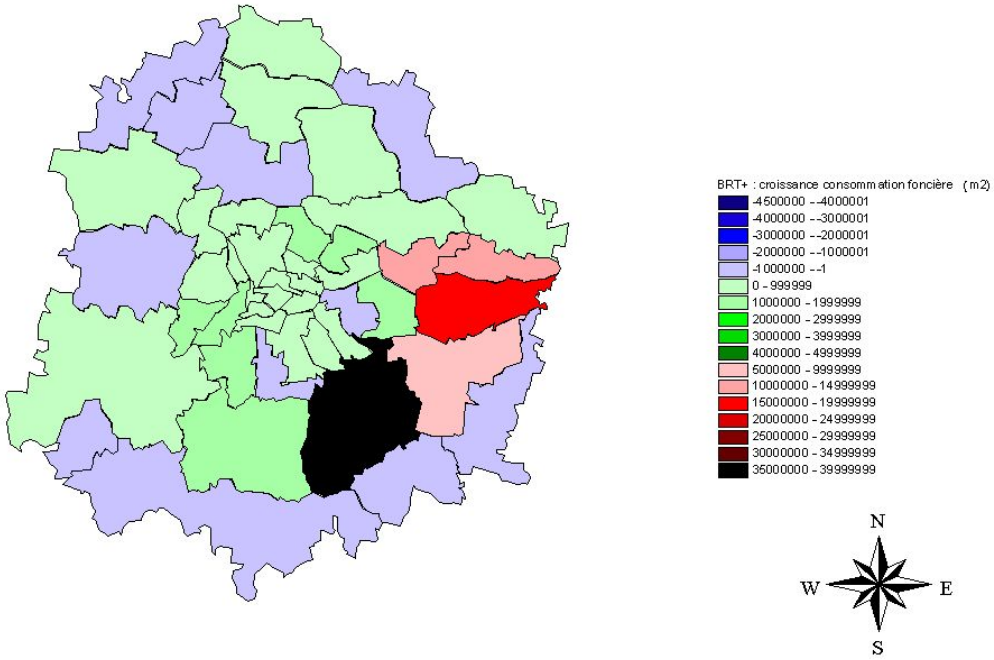
Evolution de la consommation foncière scénario METRO+



Evolution de la consommation foncière scénario BRT-



Evolution consommation foncière scénario BRT +



V - Conclusions

Ce sixième chapitre a testé, sur l'exemple de Bangalore (Inde), la capacité de la « tenaille de politiques transport et urbanisme intégrées et complémentaires », proposée dans le deuxième chapitre de la thèse, à infléchir les trajectoires de consommations énergétiques et émissions de CO_2 liées aux transports urbains.

Pour ce faire, nous avons appliqué à notre cas d'étude, Bangalore, un outil de simulation des dynamiques de structuration urbaine, TRANUS-SETU, sélectionné et adapté dans le cinquième chapitre de la thèse. TRANUS-SETU nous permet de traduire les effets de long terme de différents scénarii de politiques urbaines sous forme de trajectoires de consommations énergétiques et émissions de CO_2 engendrées par les déplacements urbains.

Nous pouvons tirer plusieurs conclusions des résultats de l'application de TRANUS-SETU sur Bangalore.

La première conclusion est la confirmation de la pertinence de l'outil TRANUS-SETU. TRANUS-SETU permet réellement de simuler et de différencier des politiques urbaines selon leurs effets sur la mobilité, les consommations énergétiques et les émissions de gaz à effet de serre. Les scenarii testés dans ce chapitre sont des combinaisons de politiques de transport, d'usage des sols et de prix. Les effets de ces combinaisons sont quantifiés.

Ainsi TRANUS-SETU permet de tester différentes combinaisons des trois principales politiques à la disposition des aménageurs urbains : la réglementation sur l'usage des sols urbains et péri-urbains, les investissements dans des infrastructures de transport et les politiques de prix. La transparence de la SETU et du modèle TRANUS sur lequel elle s'adosse permet aux utilisateurs de suivre la chaîne de causalité conduisant des décisions politiques aux consommations d'énergie et émissions de GES liées. Les utilisateurs peuvent en effet clairement comprendre comment se forme la signature énergétique des décisions politiques. En cela TRANUS-SETU est un outil d'aide à la décision : il permet de discuter les alternatives politiques à partir d'évaluations quantitatives. En identifiant et hiérarchisant les priorités et les leviers d'action TRANUS-SETU opérationnalise le concept de développement durable pour les territoires urbains.

La deuxième conclusion concerne le fonctionnement du couple « transport – usage des sols » et ses effets sur la structure urbaine. Nous constatons de fortes similitudes entre l'évolution de la structure urbaine dans le scénario « BRT- » et les tendances dans les dynamiques de structuration urbaine observées à Bogota depuis l'introduction du BRT TransMilenio et décrites dans le chapitre 4. En effet, dans le cas du TransMilenio à Bogota (chapitre 4) comme dans le scénario « BRT- » à Bangalore (chapitre6), nos analyses mettent en exergue deux phénomènes parallèles. D'un coté, l'accessibilité du centre traditionnel est améliorée par l'introduction du BRT, ce qui renforce son attractivité pour les investisseurs et se traduit par une densité des zones centrales qui ne diminue pas. Le centre ville, en tant que centre de gravité, est renforcé. D'un autre coté, la construction du BRT ouvre la périphérie à l'urbanisation : la périphérisation des résidences est accélérée et l'aire fonctionnelle urbaine s'élargit.

La troisième conclusion concerne l'efficacité énergétique des leviers d'action à la disposition des aménageurs urbains, discutée dans le chapitre 2. Les analyses menées dans ce sixième chapitre confirment que les politiques urbaines peuvent efficacement influencer les consommations énergétiques et les émissions de CO_2 liées aux transports. Sur vingt ans, un scénario au fil de l'eau, reproduisant ce qui se fait actuellement à Bangalore, verrait les consommations énergétiques et les émissions de CO_2 augmenter de 70% par rapport à l'année 2003. Si les autorités décident – dans le cadre d'une approche trafic - de mener une politique «tout route», augmentant fortement la mobilité

des citadins, elle verra les consommations énergétiques et les émissions de GES croître de +99% par rapport à 2003. Au contraire si l'option politique retenue est d'investir dans un système de transport de masse, le métro ou le BRT, et de combiner cet investissement avec une réglementation des usages de sols adaptée, les consommations énergétiques et les émissions des GES n'augmenteraient que de 9% par rapport à 2003 pour le cas « METRO+ », ou seraient réduites de -6% dans le cas de figure « BRT+ ».

La quatrième conclusion concerne la « tenaille de politiques transport et urbanisme intégrées et complémentaires » proposée dans le chapitre 2. Les analyses effectuées dans ce sixième chapitre confirment que l'intégration des politiques de transport et des politiques d'usage des sols est essentielle pour atteindre des objectifs exigeants de lutte contre l'effet de serre. En effet si les investissements dans un système de transport de masse, métro ou BRT, permettent d'infléchir les courbes d'évolution des consommations énergétiques, passant d'une croissance de +70% sur vingt ans dans le cas du « BAU » à +51% dans le cas « METRO- », seule l'intégration de ces investissements avec une réglementation des usages des sols complémentaire permet d'inverser réellement la tendance et de stabiliser les consommations énergétiques au niveau de 2003. L'intégration de la construction d'un métro avec une politique de densification par récupération des espaces vacants et endiguement de l'étalement urbain réduit la croissance des consommations énergétiques à seulement +9% en vingt ans. La combinaison d'un BRT et d'un développement urbain orienté vers les zones desservies par le BRT permet même de réduire les consommations énergétiques de -6% par rapport à 2003.

Une limite de notre étude est que nous ne testons que des politiques « one shot » : nous ne simulons pas de scénario avec des séquences différentes dans les investissements dans les infrastructures de transport, l'évolution de la réglementation des usages des sols ou des prix.

Enfin, la dernière conclusion concerne les tendances alarmantes dans l'évolution des structures urbaines des villes du Sud mises en avant dans le chapitre 1. A l'instar de la comparaison entre Atlanta et Barcelone, les simulations effectuées dans ce sixième chapitre montrent qu'il est possible de les influencer significativement avec des politiques réalistes de transport et d'urbanisme intégrées et complémentaires.

Conclusions de la troisième partie

Les deux chapitres de cette troisième partie avaient pour objectif 1) de trouver un outil de simulation des dynamiques de structuration urbaine satisfaisant les exigences issues des analyses, développées dans les deux premières parties de la thèse, sur les déterminants des consommations énergétiques engendrées par les déplacements urbains, 2) de tester la capacité de la « tenaille » proposée dans le chapitre 2, à infléchir les trajectoires de consommations d'énergie liées aux transports urbains et de répondre à partir de l'exemple de Bangalore (Inde) à la question initiale de la thèse.

Le cinquième chapitre démontre, à partir d'une revue critique de la littérature, que TRANUS est un outil de simulation des dynamiques de structuration urbaine cohérent avec notre objet et notre objectif de recherche et offre le meilleur équilibre entre les exigences de pertinence théorique, de mesurabilité et d'applicabilité. TRANUS est un modèle reconnu, gratuit et le plus appliqué dans le monde, au Nord comme au Sud. Il est capable de tester différentes combinaisons des leviers d'actions à la disposition des aménageurs urbains et est donc mobilisable dans notre programme de recherche. Nous le complétons par un module de quantification des consommations énergétiques et des émissions de CO_2 liées aux transports urbains des passagers, la Signature Energétique des Transports Urbains (SETU). TRANUS-SETU permet ainsi de construire des trajectoires de consommations d'énergie et d'émissions de CO_2 engendrées par les déplacements urbains de passagers.

Le sixième chapitre démontre, à partir d'une application de TRANUS-SETU au cas emblématique de Bangalore (Inde), que des politiques réalistes de transport et d'urbanisme intégrées et complémentaires permettent des inflexions significatives des consommations énergétiques et des émissions de CO_2 liées aux transports urbains des passagers sur le long terme. Ainsi la « tenaille » proposée dans le chapitre 2 est une stratégie efficace de réduction des consommations énergétiques liées aux déplacements urbains. Nous pouvons donc répondre positivement à la question initiale de la thèse.

Conclusions générales de la thèse

1) Retour à la question initiale : Compte tenu des dynamiques de croissance démographique et des faibles capacités financières, les technologies accessibles aux villes du Sud sont-elles aptes à infléchir les trajectoires des consommations énergétiques et les émissions de CO_2 liées aux transports urbains de passagers ?

Les analyses effectuées dans la thèse nous permettent de répondre positivement à la question initiale. Les villes pauvres à croissance démographique rapide disposent de technologies de transport pour infléchir leurs trajectoires de consommations énergétiques et émissions de CO_2 liées aux transports urbains. De plus, elles disposent des outils d'aide à la décision capables de quantifier des alternatives de politiques urbaines et donc d'aider à la mise en place de stratégies durables de développement urbain.

Au travers des recherches menées sur deux exemples urbains emblématiques, Bogota (Colombie) et Bangalore (Inde), notre thèse démontre ainsi qu'un renouvellement des paradigmes technologiques n'est pas indispensable pour relever le défi environnemental de la transition urbaine au Sud. Nous montrons que, à l'instar du bâtiment, le défi de la réduction de la croissance tendancielle inquiétante des consommations d'énergie dans les transports urbains n'est pas principalement d'ordre technologique.

Pour parvenir à ce résultat, nous nous appuyons sur un raisonnement en trois étapes : la première étape a défini d'une part les déterminants des consommations énergétiques liées aux transports urbains et d'autre part les leviers d'action pour les infléchir (partie 1) ; la deuxième étape a approfondi la compréhension des interactions entre ces déterminants (partie 2) ; la troisième étape a sélectionné un outil de simulation des dynamiques urbaines en fonction des conclusions des deux étapes précédentes, et l'a appliqué sur un cas urbain emblématique afin de répondre à notre question initiale.

Nous avons conclu le premier chapitre de la thèse sur la nécessité de centrer l'analyse des consommations énergétiques et émissions de CO_2 liées aux transport urbains sur le fonctionnement du couple « transport – usage des sols » qui est au cœur des dynamiques de structuration de l'espace urbain, et par là détermine les niveaux de consommation d'énergie engendrée par les déplacements urbains.

Notre analyse critique des deux principaux courants d'analyse des déterminants des consommations énergétiques des transports urbains démontre que l'étude des consommations d'énergie liées aux déplacements urbains ne peut pas se satisfaire d'une approche « macro-urbaine » centrée sur la densité moyenne et des paramètres a-saptiaux tels que la répartition modale des déplacements, le taux de motorisation ou la richesse moyenne par habitant. Il est nécessaire d'entrer dans la complexité systémique urbaine et d'analyser la structure spatiale urbaine définie par Bertaud (2001) comme la complémentarité entre la distribution spatiale de la population et la distribution spatiale des déplacements.

La discussion menée dans le deuxième chapitre sur les leviers d'action à la disposition des aménageurs urbains pour placer les transports urbains dans les villes du Sud sur des trajectoires soutenables environnementalement nous a conduit à soutenir deux thèses : premièrement, la tâche prioritaire des politiques urbaines est d'anticiper et d'accompagner les dynamiques de marché qui structurent l'espace urbain ; deuxièmement, il est nécessaire de « prendre en tenaille » des consommations énergétiques des déplacements urbains par des politiques transport et urbanisme intégrées et complémentaires.

Une analyse critique des débats sur la forme urbaine durable idéale qui ont animé l'histoire des théories urbanistiques montre que l'ambition de définir et répliquer dans divers contextes la forme urbaine idéale, limitant les consommations énergétiques liées aux déplacements des citadins, est un projet du passé, s'inscrivant dans un urbanisme des « démiurges » (Haeringer, 2000) dont la « dictature des marchés » (Renard, 2003) a sonné le glas. Les forces du marché sont tellement puissantes en matière d'usage des sols, qu'il est non seulement très difficile, mais inefficace, pour la puissance publique, de s'y opposer frontalement. La tâche prioritaire n'est donc pas de concevoir une forme de ville idéale mais, plus modestement, d'anticiper et d'accompagner les dynamiques de marché conduisant à la structuration de l'espace urbain, c'est-à-dire d'encadrer le développement urbain spontané par une planification centrée sur le fonctionnement du couple « transport – usage des sols ».

Nous soutenons alors la thèse d'une nécessaire « prise en tenaille » des consommations énergétiques des transports urbains par des politiques de transports et d'urbanisme intégrées et complémentaires visant d'un coté à réduire la demande de mobilité tout en améliorant l'accessibilité aux aménités offertes par la ville et de l'autre coté à rendre cette mobilité peu polluante. Nous montrons que, si les différentes mesures d'amélioration de l'efficacité environnementale des véhicules constituent des opportunités de réduction des consommations énergétiques et émissions de GES liées, leur efficacité pour lutter contre l'effet de serre et infléchir significativement les trajectoires des consommations énergétiques dans les villes du Sud restent très limitées. Il s'agit donc de maîtriser la répartition modale des déplacements et plus profondément les besoins de déplacement. La structure urbaine de beaucoup de villes du sud est heureusement aujourd'hui encore adaptée aux systèmes de transports de masse basés sur des corridors de transit. Il est donc nécessaire et possible de décourager l'usage des véhicules particuliers et de promouvoir des transports en commun efficaces afin de conserver la répartition modale aujourd'hui encore souvent à l'avantage des transports en commun. D'autre part, les politiques visant à réduire la demande de mobilité recouvrent un ensemble de mesures pratiques pour influencer la structuration d'une ville : adapter les règles d'urbanisme, les POS et COS pour faciliter la concentration des investissements privés dans les zones de forte accessibilité engendrées par la construction d'une infrastructure de Transport Rapide de Masse (TRM), pour diminuer le besoin de mobilité grâce à une densité et une mixité des fonctions plus fortes, favoriser les déplacements non motorisés par un « design » urbain approprié et l'articulation des divers modes de transport.

Les résultats des analyses développées dans la première partie de la thèse (chapitre 1 et 2) nous ont donc conduit à nous interroger dans la deuxième partie sur les relations fonctionnelles entre le système de transport et le système d'usage des sols définissant le couple « transport – usage des sols », sur l'articulation entre ce couple et les marchés foncier et immobiliers, et sur la chaîne de causalité selon laquelle l'évolution de ce couple se traduit en termes de structuration urbaine.

Dans le troisième chapitre, nous avons analysé, depuis la fondation de Bogota en 1538 jusqu'à la fin du 20ème siècle, les liens entre l'évolution du système transport et celle du système d'usage des sols, et les processus de structuration urbaine successivement engendrés. Nous avons démontré qu'il n'y a pas d'effet structurant prédominant dans le processus de structuration urbaine, ni de la part des infrastructures de transport, ni de la part des politiques publiques. Ce sont bien les relations fonctionnelles au sein du couple « transport – usage des sols » qui sont au cœur des dynamiques de structuration urbaine et donc des consommations énergétiques liées aux déplacements urbains. Des équilibres successifs s'établissent entre la distribution spatiale des résidences et des activités, générant une demande de mobilité, et le système de transport, caractérisant une offre de mobilité. La situation de la mobilité, l'activité de production foncière et immobilière, la planification urbaine et la politique d'investissement dans les infrastructures de transport sont interdépendantes et co-déterminées. Ces équilibres se traduisent alors d'une part dans une matrice Origine-Destination et une répartition modale des déplacements réalisés – et donc dans les consommations énergétiques liées aux transports urbains - et d'autre part dans la distribution spatiale des prix fonciers et immobiliers. Nous avons montré d'autre part que les décisions de localisation des investissements résidentiels et d'activités et les prix fonciers et immobiliers sont de même interdépendants et co-déterminés. Les dynamiques des marchés fonciers et immobiliers sont alors à la fois le reflet et des causes du processus de structuration

urbaine. Enfin, nos analyses concluent que les relations fonctionnelles au sein du couple « transport – usage des sols » se construisent dans un cadre défini par la géographie physique du site, les héritages successifs, les politiques menées au niveau national et les caractéristiques culturelles et historiques nationales.

Nous avons analysé dans le quatrième chapitre les perturbations de l'équilibre en place à la fin du 20ème siècle engendrées par l'introduction d'une infrastructure de Transport Rapide de Masse (TRM), le BRT TransMilenio, et leurs conséquences sur les dynamiques de structuration urbaine. Nous avons montré d'une part que le TransMilenio a des effets significatifs sur les systèmes de transport et d'usage des sols du fait de l'amélioration de l'accessibilité à la ville qu'elle apporte aux zones desservies, et d'autre part que la traduction de ces effets dans les dynamiques de structuration urbaine dépend de la structure urbaine héritée, de la réaction des investisseurs privés (promoteurs immobiliers, populations résidentes, fonctions productives, etc.), de l'attitude des autres opérateurs de transports et enfin des politiques d'urbanisme mises en place, c'est-à-dire de la réaction du couple « transport – usage des sols ». Nous démontrons que cette réaction varie au cours des trois phases de la mise en œuvre du projet de TRM : l'élaboration du projet ; les travaux de construction ; l'opération du système. Le BRT a des effets positifs sur les valeurs foncières et immobilières des zones desservies et cette valorisation est le reflet et la cause des modifications du processus de structuration urbaine. La compétition sur les marchés foncier et immobiliers pour se localiser dans l'aire de chalandise du BRT s'accompagne de phénomènes d'anticipation. Le TransMilenio semble agir comme un catalyseur des investissements et de l'activité immobilière vers ses zones d'influences. Les fonctions urbaines ont tendance à se concentrer dans la centralité axiale historique élargie et dans la deuxième couronne, en périphérie de Bogota. L'attractivité de la première couronne entourant la centralité historique diminue. Nous avons ainsi mis en exergue d'une part une consolidation et une densification le long des corridors BRT, et d'autre part un élargissement de l'aire fonctionnelle de Bogota. Ce qui révèle dans les dynamiques de structuration urbaine des tendances inverses à celles observées pour les dernières décennies du 20ème siècle.

Ainsi les résultats des analyses développées dans les deux premières parties de la thèse (chapitre 1, 2, 3, et 4) concluent 1) sur le rôle clef du couple « transport – usage des sols » dans les dynamiques de structuration urbaine et par là pour le niveau d'énergie consommée dans les déplacements urbains, 2) sur la multiplicité, l'interdépendance et la co-détermination des paramètres intervenant dans les relations fonctionnelles au sein de ce couple, et donc 3) sur la nécessité de disposer d'un outil de simulation des dynamiques de structuration urbaine pour tester les thèses avancées en première partie concernant les leviers d'action pertinents pour infléchir significativement les trajectoires de consommations énergétiques liées aux transports urbains.

Nous avons alors cherché un modèle existant, opérationnel, reconnu et satisfaisant certaines exigences issues des analyses menées dans les deux premières parties de la thèse. Puis nous avons appliqué ce modèle à un second exemple urbain emblématique, Bangalore (Inde), pour tester les effets des politiques présentées dans le chapitre 2 sur les trajectoires de consommations énergétiques liées aux déplacements urbains.

A partir d'un état de l'art des outils de simulation des dynamiques de structurations urbaines existants, nous montrons dans le cinquième chapitre qu'il existe une famille de modèles, les modèles interactifs de prévision quasi-dynamiques spatiaux-économiques, qui est cohérente avec notre objet et notre objectif de recherche et offre le meilleur équilibre entre la pertinence théorique, la mesurabilité et l'applicabilité. Parmi les modèles de cette famille, nous démontrons que TRANUS est le plus pertinent pour simuler différentes combinaisons des leviers d'action à la disposition des aménageurs urbains et construire des trajectoires de consommation énergétique et d'émission de CO_2.

Ensuite, à l'aide de TRANUS que nous avons complété par la Signature Energétique des Transports Urbains (SETU), traduction en terme de consommation d'énergie et d'émission de CO_2 des sorties du modèle TRANUS, nous avons testé dans le sixième chapitre la capacité des politiques transport et urbanisme intégrées et complémentaires, la « tenaille » discutée dans le chapitre 2, à infléchir significativement les trajectoires de consommations énergétiques liées aux transports urbains

sur le cas de Bangalore (Inde). Nous montrons que, avec des politiques réalistes de transport et d'urbanisme intégrées et complémentaires, des inflexions significatives des consommations énergétiques et des émissions de CO_2 liées aux transports urbains des passagers sont envisageables sur le long terme.

Cette thèse permet alors de formuler trois séries de recommandations : i) sur les stratégies de réductions des consommations énergétiques et émissions de CO_2 liées aux transports urbains ; ii) sur les tactiques pour mettre en œuvre ces stratégies environnementales ; iii) sur le contenu des politiques urbaines.

2) Sur les stratégies de réduction des consommations énergétiques et des émissions de CO_2 liées aux transports urbains

Notre thèse montre que les aménageurs urbains – privés et publics – disposent de leviers d'action pour infléchir les trajectoires de consommations énergétiques et émissions de CO2 liées aux déplacements dans les villes du Sud.

Il s'agit pour l'essentiel d'une part d'anticiper et d'autre part d'accompagner les dynamiques de marché conduisant à la structuration de l'espace urbain, c'est-à-dire d'encadrer le développement urbain spontané par une planification centrée sur le fonctionnement du couple « transport –usages des sols ». Nous montrons en effet qu'une « prise en tenaille » des consommations énergétiques des transports urbains par des politiques transports et urbanisme intégrées et complémentaires permet d'un coté de réduire la demande de mobilité tout en améliorant l'accessibilité aux aménités offertes par la ville et de l'autre coté de rendre cette mobilité peu polluante. D'autre part, notre analyse des effets du TransMilenio sur la structure urbaine de Bogota (chapitre 4) et nos simulations effectuées sur Bangalore (chapitre 6) mettent en exergue que, pour contraindre l'étalement urbain diffus, il est indispensable de coupler à l'introduction d'une infrastructure de Transport Rapide de Masse (TRM) une vigoureuse politique d'usage des sols.

Nous souhaitons enfin insister sur un point qui nous paraît fondamental : les politiques d'usage des sols, tout comme celles de transport, ne sont que des moyens au service d'objectifs plus larges. Des objectifs politiques clairs et stables concernant « la ville que l'on veut » doivent donc les rendre cohérentes entre elles. Cependant, dans la pratique, il faut constater que les plans d'urbanisme et les plans de transport sont encore le plus souvent élaborés de façon indépendante, sans véritable prise en compte des interactions et même sans objectif commun clairement défini.

3) Sur les tactiques pour mettre en œuvre les stratégies de réduction des consommations énergétiques et des émissions de CO_2 liées aux transports urbains

Une stratégie d'anticipation et d'accompagnement des dynamiques de marché structurant la ville nécessite d'une part des informations pour renseigner l'analyse des dynamiques urbaines spontanées, et d'autre part l'usage des outils de simulation capables d'évaluer quantitativement selon différents critères les scénarii alternatifs de développement urbain.

Nous avons démontré que ces outils de simulation existent. TRANUS permet de simuler et d'évaluer les effets des politiques de transport et des politiques d'urbanisme selon différents critères. La hiérarchie des critères orientant la décision relève bien évidemment du politique. L'usage d'un outil comme TRANUS permet aux décideurs publics de discuter différentes alternatives politiques – intégrant les questions énergétiques - à partir d'évaluations quantitatives. Les utilisateurs peuvent aisément comprendre comment se forme la signature énergétique des décisions politiques simulées. En cela, il est un outil d'aide à la discussion entre les différentes parties prenantes du développement urbain et donc un outil d'aide à la décision. Il opérationnalise le concept de développement durable en identifiant et hiérarchisant les priorités et les leviers d'action appropriés à une dynamique territoriale. TRANUS est un logiciel en accès libre, certes difficile à prendre en main mais une petite équipe locale

formée pourrait facilement l'appliquer et s'en servir comme outil de suivi-évaluation et d'accompagnement de la planification urbaine sur le moyen et long terme.

Ensuite il est nécessaire de renseigner l'analyse des dynamiques urbaines spontanées, notamment par un Système d'Information Géographique (SIG) et un observatoire de l'évolution des prix fonciers et immobiliers. Aux termes de notre analyse, il apparaît en effet pertinent de constituer de petites équipes locales dont la charge serait d'observer et d'analyser les différents acteurs intervenant sur les marchés fonciers et immobiliers et leurs effets cumulés sur les prix, et par là sur la structure urbaine.

4) Sur le contenu des politiques urbaines de réduction des consommations énergétiques et des émissions de CO_2 liées aux transports urbains

Nous tenons à insister sur le fait que l'adaptation de ces politiques au contexte local est un élément crucial de l'usage de cette « boîte à outil » à la disposition des aménageurs locaux. Les « cultures » de la planification urbaine sont très différentes d'une région du monde à une autre. Les dynamiques de structuration urbaine sont très différentes d'une ville à une autre. De la même façon qu'il est vain de chercher à définir et répliquer dans divers contextes une forme urbaine idéale, nous pensons qu'il est illusoire de vouloir constituer un « guide des bonnes politiques ». La pertinence du contenu des politiques urbaines dépend de son adaptation à la situation locale. Pour exemple, nos travaux sur Bogota et Bangalore nous ont appris que, si le choix de construire un métro ou un BRT doit s'appuyer sur des études technico-éco-urbanistiques, la pertinence de ce choix relève de critères *ad hoc*, définis en fonction d'un contexte institutionnel daté et situé.

Enfin, s'il nous semble vain de constituer un « guide des bonnes politiques », il apparaît par contre que « les voyages d'étude » effectués par une équipe locale dans une autre ville, du Nord mais surtout du Sud, pour rencontrer les acteurs locaux et comprendre pourquoi et comment une politique a pu être couronnée d'un succès exemplaire sont clairement des « bonnes pratiques » à reproduire. A l'instar du succès de l'adaptation du système de BRT à Bogota, la thèse met en avant des processus de (ré-)invention des technologies dans les villes du Sud. Les nouvelles technologies de transport introduites dans les villes du Sud sont souvent encore considérées comme des « transferts depuis le Nord » alors que le succès de leur mise en oeuvre relève de leur adaptation au contexte institutionnel local et constituent plutôt des innovations technologiques du Sud, exemplaires en elles-mêmes. L'apparition en Chine de vélos électriques rechargés par des panneaux solaires en est un autre signe.

La fenêtre du durable dans l'univers des possibles semble plus être une fenêtre d'opportunité ouverte par une convergence locale. Nous estimons donc que, si la volonté existe, le chemin se dessine et qu'au final « peu importe que le chat soit gris ou noir pourvu qu'il attrape les souris[146] ».

[146] Deng Xiaoping

Annexe 1 : Liste des villes étudiées par Kenworthy (Kenworthy, 2003)

USA	CANADA	AUST/NZ	WESTERN EUROPE	WESTERN EUROPE	HIGH INCOME ASIA
Atlanta (2.90)	Calgary (0.77)	Brisbane ((1.49)	Graz (0.24)	Athens (3.46)	Osaka (16.83)
Chicago (7.52)	Montreal (3.22)	Melbourne (3.14)	Vienna (1.59)	Milan (2.46)	Sapporo (1.76)
Denver (1.98)	Ottawa (0.97)	Perth (1.24)	Brussels (0.95)	Bologna (0.45)	Tokyo (32.34)
Houston (3.92)	Toronto (4.63)	Sydney (3.74)	Copenhagen (1.74)	Rome (2.65)	Hong Kong (6.31)
Los Angeles (9.08)	Vancouver (1.90)	Wellington (0.37)	Helsinki (0.89)	Amsterdam (0.83)	Singapore (2.99)
New York (19.23)			Lyon (1.15)	Oslo (0.92)	Taipei (5.96)
Phoenix (2.53)			Nantes (0.53)	Barcelona (2.78)	
San Diego (2.63)			Paris (11.00)	Madrid (5.18)	
S. Francisco (3.84)			Marseilles (0.80)	Stockholm (1.73)	
Washington (3.74)			Berlin (3.47)	Bern (0.30)	
			Frankfurt (0.65)	Geneva (0.40)	
			Hamburg (1.70)	Zurich (0.79)	
			Dusseldorf (0.57)	London (7.01)	
			Munich (1.32)	Manchester (2.58)	
			Ruhr (7.36)	Newcastle (1.13)	
			Stuttgart (0.59)	Glasgow (2.18)	
Av. Pop. 5.74	Av. Pop. 2.30	Av. Pop. 2.00	continued	Av. Pop. 2.17	Av. Pop. 11.03

EASTERN EUROPE	MIDDLE EAST	AFRICA	LATIN AMERICA	LOW INCOME ASIA	CHINA
Prague (1.21)	Tel Aviv (2.46)	Dakar (1.94)	Curitiba (2.43)	Manila (9.45)	Beijing (8.16)
Budapest (1.91)	Teheran (6.80)	Cape Town (2.90)	S. Paulo (15.56)	Bangkok (6.68)	Shanghai (9.57)
Krakow (0.74)	Riyadh (3.12)	Jo'burg (2.25)	Bogota (5.57)	Mumbai (17.07)	Guangzhou (3.85)
	Cairo (13.14)	Harare (1.43)		Chennai (6.08)	
	Tunis (1.87)			K. Lumpur (3.77)	
				Jakarta (9.16)	
				Seoul (20.58)	
				HCM City (4.81)	
Av. Pop. 1.29	Av. Pop. 5.48	Av. Pop. 2.13	Av. Pop. 7.85	Av. Pop. 9.70	Av. Pop. 7.19

Source : Kenworthy, 2003

Annexe 2 : Résultats de l'étude réalisée par Kenworthy (Kenworthy, 2003)

	unit	USA	Australie N. Zeland	Canada	Europe de l'Ouest	Asie Riche	Europe de l'Est	Moyen Orient	Amérique Latine	Afrique	Asie pauvre	Chine
Metropolitan gross domestic product per capita	$ / hab	31,386	19,775	20,825	32,077	31,579	5,951	5,479	4,931	2,820	3,753	2,366
Passenger car per GDP	Cars / $1000	18.71	29.09	25.43	12.90	6.66	55.78	24.49	41.04	47.89	28.08	11.03
Motor cycles per GDP	Mc / $1000	0.42	0.68	0.46	1.00	2.78	3.50	3.49	2.91	1.96	33.90	23.30
Passenger car passenger kilometres per capita	p.km/ person	18,155	11,387	8,645	6,202	3,614	2,907	3,262	2,862	2,652	1,855	814
Motor cycle passenger kilometres per capita	p.km/ person	45	81	21	119	357	19	129	104	57	684	289
Passenger car passenger kilometres per $ of GDP	p.km/ $1000	578.44	575.80	415.15	193.35	114.44	488.57	595.37	580.35	940.48	494.13	344.05
Motor cycle passenger kilometres per $ of GDP	p.km/ $1000	1.43	4.11	1.0	3.70	11.32	3.13	23.57	21.17	20.09	182.20	122.34
Motor cycle passenger kilometres per $ of GDP	p.km/ $1000	579.86	579.91	416.14	197.05	125.76	491.70	618.94	601.53	960.57	676.33	466.39
Private passenger transport energy use per capita	MJ/person	60,034	29,610	32,519	15,675	9,556	6,661	10,573	7,283	6,184	5,523	2,498
Private passenger transport energy use per $ of GDP	MJ/$1000	1913	1497	1562	489	303	1,119	1,930	1,477	2,193	1,471	1,055

	unit	USA	Australie N. Zeland	Canada	Europe de l'Ouest	Asie Riche	Europe de l'Est	Moyen Orient	Amérique Latine	Afrique	Asie pauvre	Chine
Metropolitan gross domestic product per capita	$ / hab	31,386	19,775	20,825	32,077	31,579	5,951	5,479	4,931	2,820	3,753	2,366
Total public transport seat kilometres of service per capita	seat km/person	1,556.8	3,627.9	2,289.7	4,212.7	4,994.8	4,170.3	1,244.6	4,481.2	5,450.3	2,698.8	1,171.3
Total public transport seat kilometres per $ of GDP	seat km/$1 000	49.60	183.46	109.95	131.33	158.17	700.80	227.16	908.78	1932.77	719.01	495.01
Total length of reserved public transport routes per 1000 persons	m/1000 person	48.6	215.5	55.4	192.0	53.3	200.8	16.1	19.3	40.2	16.1	2.3
Total length of reserved public transport routes per $ of GDP	km/$1 000	1.55	10.90	2.66	5.99	1.69	33.74	2.93	3.92	14.25	4.30	0.96
Length of freeway per person	m/ person	0.156	0.129	0.122	0.082	0.020	0.031	0.053	0.003	0.018	0.015	0.003
Length of freeway per $ of GDP	km/$1 000	4.97	6.52	5.85	2.56	0.65	5.26	9.59	0.62	6.41	3.99	1.17

	unit	USA	Australie N. Zeland	Canada	Europe de l'Ouest	Asie Riche	Europe de l'Est	Moyen Orient	Amérique Latine	Afrique	Asie pauvre	Chine
Metropolitan gross domestic product per capita	$ / hab	31,386	19,775	20,825	32,077	31,579	5,951	5,479	4,931	2,820	3,753	2,366
Total public transport boardings per capita	bd./person	59.2	83.8	140.2	297.1	430.5	711.5	151.8	265.1	195.4	231.0	374.9
Proportion of total motorised passenger kilometres on pub. transport	%	2.9%	7.5%	9.8%	19.0%	45.9%	53.0%	29.5%	48.2%	50.8%	41.0%	55.0%

Source : Kenworthy, 2003

Annexe 3 : Zonage de l'agglomération de Bogota proposé par JICA lors de l'élaboration du Plan de Transport (JICA, 1996)





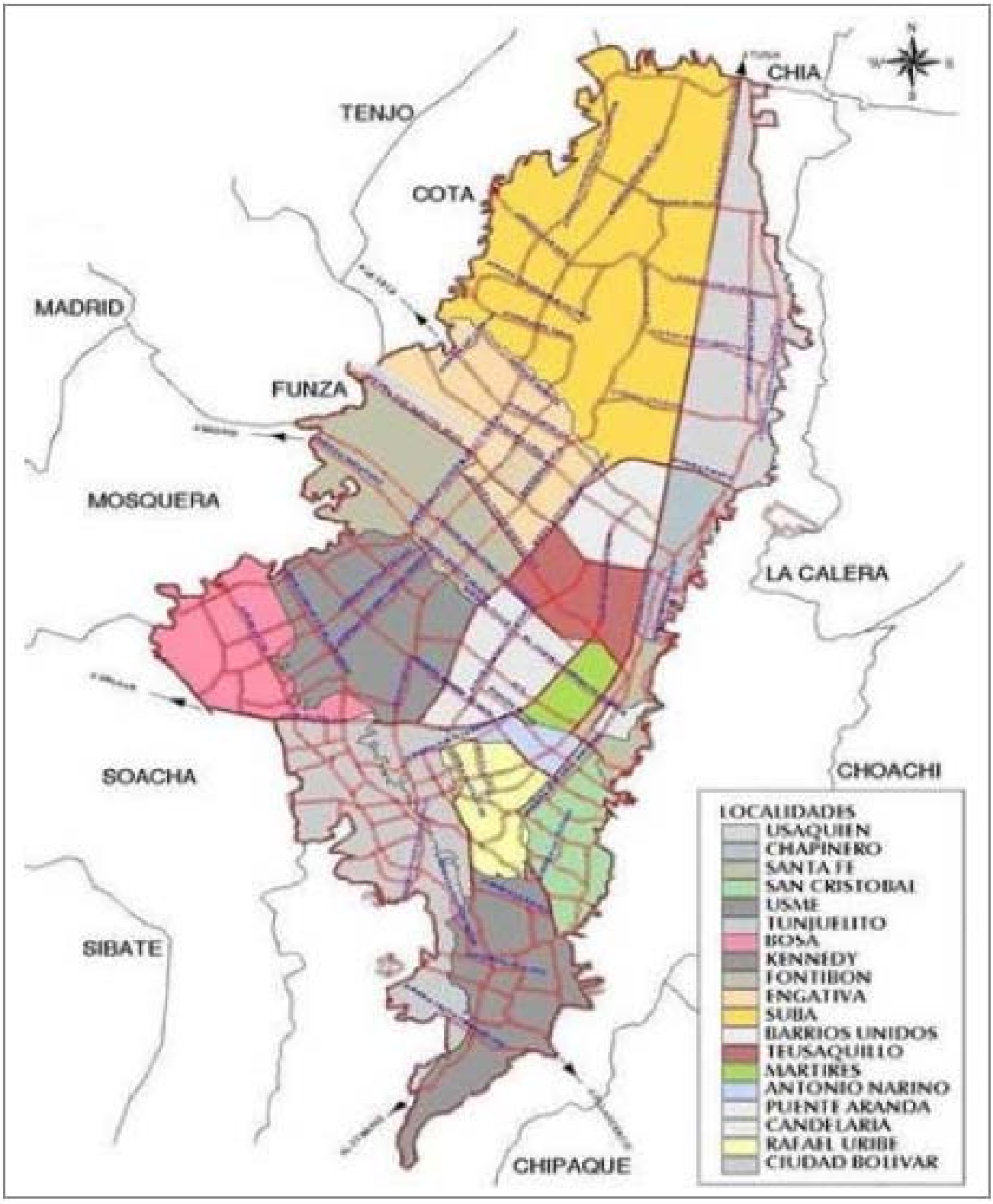
Localité	Zones JICA	Localité	Zone JICA
Usaquen	1	**Engativa**	54
	2		55
	3		56
	4		57
	5		58
	6		59
	7		60
	8		61
Chapinero	9		62
	10	**Suba**	63
	11		64
	12		66
	13		67
Santa Fe	14		68
	15		69
	16		70

	17	**Barrios Unidos**	71
	18		72
La Candaleria	19		73
	20		74
San Cristobal	21		75
	22	**Teusaquillo**	76
	23		77
	24		78
	25		79
	26		80
Usme	27		81
	28		82
	29	**Los Martires**	83
	30		84
	31		85
Tunjuelito	32		86
	33		87
	34	**Antonio Narino**	88
	35		89
Bosa	36		90
	37		91
	38		92
Kennedy	39	**Puente Aranda**	93
	40		94
	41		95
	42		96
	43		97
	44		98
	45		99
	46		100
Fontibon	47		101
	48	**Rafael Uribe**	102
	49		103
	50		104
	51		105
	52	**Ciudad Bolivar**	106
	53		107
			108

Annexe 4 : Les localités du District de Bogota



Annexe 5 : Les municipalités environnantes du District de Bogota



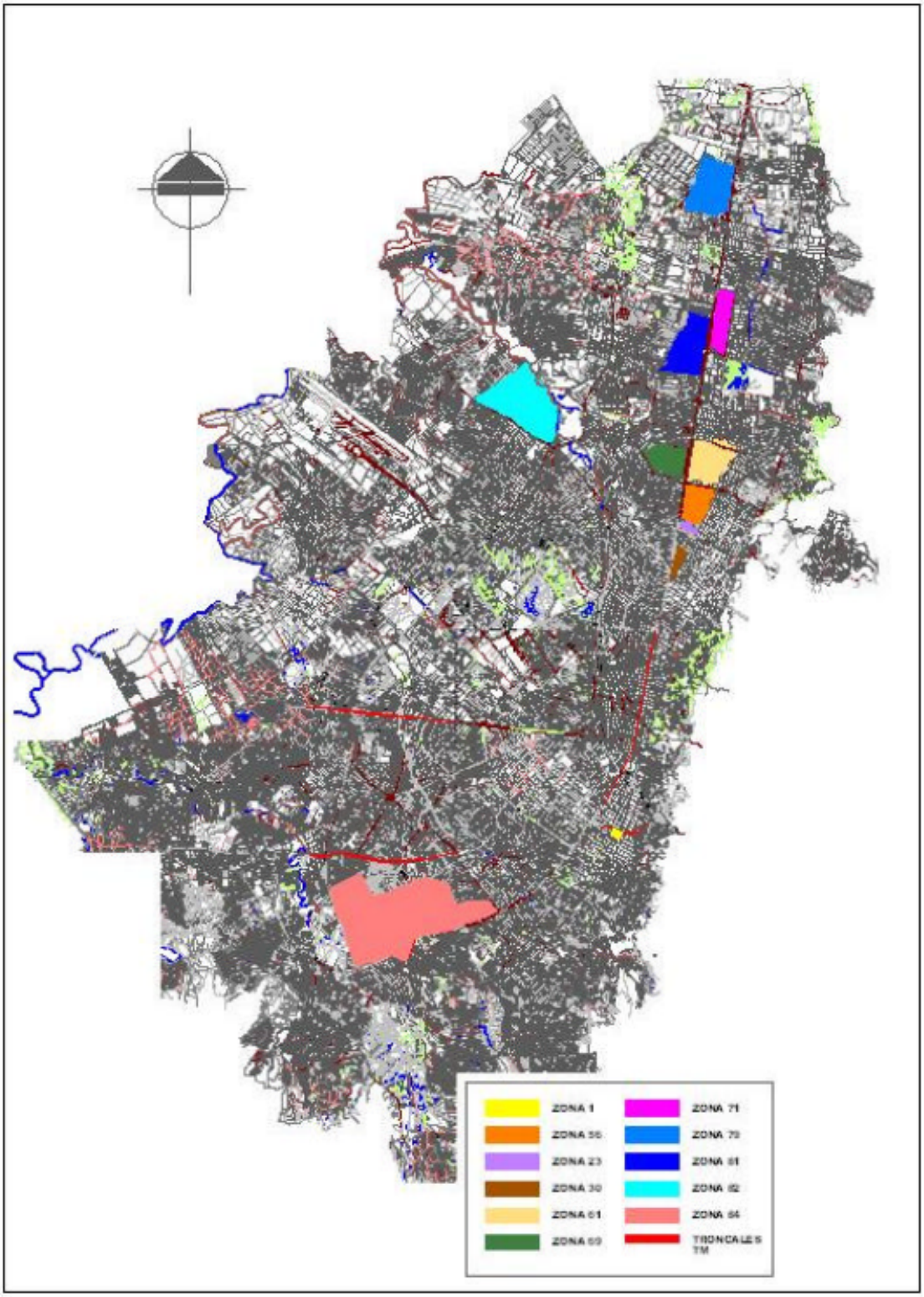
Fuente: DAPD

Annexe 6 : Caractéristiques de 11 zones d'études affectées par le TransMilenio

Corridor BRT affectant la zone d'étude	Zone	Localisation	municipalité	*Estrato*	Usages du sol majoritaires
Av. Jimenez	**1**	AV. JIMÉNEZ CON CR 7ª. CLS 13-15; CRS 6 –8	Santa Fé	3	Commerce
Autoroute Nord	**23**	CL 90 - TRAMO 2; CL 90; CRS 16 – AUTOP. NORTE (CR 22)	Chapinero	6	Résidentiel Commerce
Autoroute Nord	**30**	EL LAGO; CLS 74 – 85; CR 16 – AUTOP. NORTE (CR16 A)	Chapinero	5	Commerce
Autoroute Nord	**56**	CHICO – CHICO NORTE; CLS 92 – 99; CR 17- AUTOP. (CR 23)	Chapinero	6	Résidentiel Commerce
Autoroute Nord	**61**	SANTA BIBIANA - SAN PATRICIO – NAVARRA; CL 101 – 114; CR 16 AUTOP. (TV 24)	Usaquen	6	Résidentiel
Autoroute Nord	**69**	PUENTE LARGO – PASADENA; CLS 101 – 107; CRS 23 – 44	Suba	5	Résidentiel
Autoroute Nord	**71**	NUEVA AUTOP. – CONTADOR – LAS MARGARITAS: CLS 134 – 151; AV 19 (TV 30) – AUTOP. NORTE (EXCL. EJES CIALES.)	Usaquen	4	Résidentiel
Autoroute Nord	**79**	VILLA DEL PRADO; CLS 170 – 187; CRS 44 – 57	Suba	4	Résidentiel
Autoroute Nord	**81**	AUTOP. NORTE-CANAL DE CORDOBA-SPRING-PRADO VERANIEGO-PRADO PINZON-SAN JOSE DEL PRADO; CLL128 A -142	Suba	3	Résidentiel
Calle 80	**82**	MINUTO – ESPAÑOLA – QUIRIGUA- BOLIVIA; CLS 81 – 92; CRS 72- 96 Y CLS 78 – 90; CRS 104 - 110	Engativa	3	Résidentiel
Av. Caracas	**84**	AV. CARACAS- AUTOP. SUR - SUROOCCIEDENTE 1- OLAYA-QUIROGA-CLARET-FATIMA; AV. 1 DE MAYO - AV. BOYACA	Rafael Uribe - Tunjuelito	3	Résidentiel

Source : Elaboration par l'auteur et M.I. Robles à partir des données de la Lonja de Propriedad Raiz de Bogota

Annexe 7 : Localisation des 11 zones d'études affectées par le TransMilenio



Source : Elaboration par M.I Robles et l'auteur.

Annexe 8 : Taux de croissance annuelle (en %) des prix fonciers des 11 zones affectées par le TransMilenio. 1991 – 2005

Zone	Usage du sol	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
1	commerce	38	36	47	45	25	13	0	0
23	résidentiel et commerce	37	69	82	63	38	11	0	0
30	commerce	50	54	73	63	27	6	6	-6
56	résidentiel et commerce	27	40	75	59	45	15	3	-6
61	résidentiel	39	45	65	71	57	3	-7	-7
69	résidentiel	36	43	61	73	41	16	0	0
71	résidentiel	23	44	67	54	31	19	0	0
79	résidentiel et commerce	35	57	61	46	35	14	0	0
81	résidentiel	23	34	55	49	39	11	4	1
82	résidentiel	31	37	52	51	39	19	9	0
84	résidentiel	35	47	50	39	26	19	18	6
moyenne zones		34	46	62	56	37	13	3	-1
IPC		27	25	23	23	19	22	18	17
moyenne - IPC		7	21	39	33	18	-9	-15	-18

Zone	Usage du sol	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	
1	commerce	0	33	8	8	0	0	4	
23	résidentiel et commerce	0	0	-10	0	0	6	2	
30	commerce	0	-7	8	0	-7	0	2	
56	résidentiel et commerce	-7	0	0	3	25	0	6	
61	résidentiel	0	8	0	11	15	6	5	
69	résidentiel	-5	0	5	8	16	20	8	
71	résidentiel	0	0	5	8	12	15	9	
79	résidentiel et commerce	10	14	4	4	11	0	7	
81	résidentiel	0	13	5	0	15	0	7	
82	résidentiel	8	15	9	12	7	7	6	
84	résidentiel	0	3	5	0	5	5	5	
moyenne zones		1	7	4	5	9	5	6	
IPC		9	9	8	7	6	6	5	
moyenne - IPC		-8	-2	-4	-2	3	-1	1	

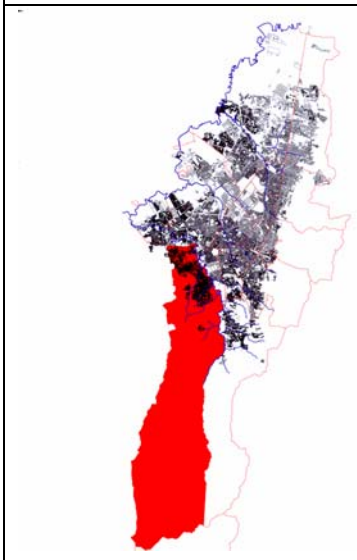
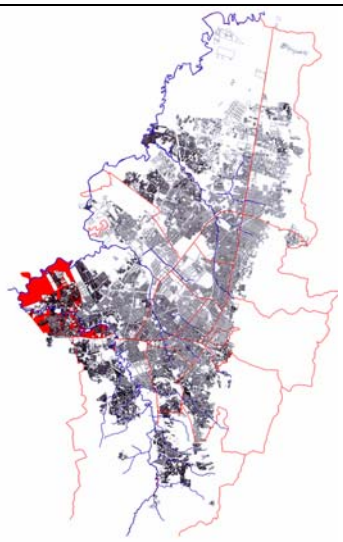
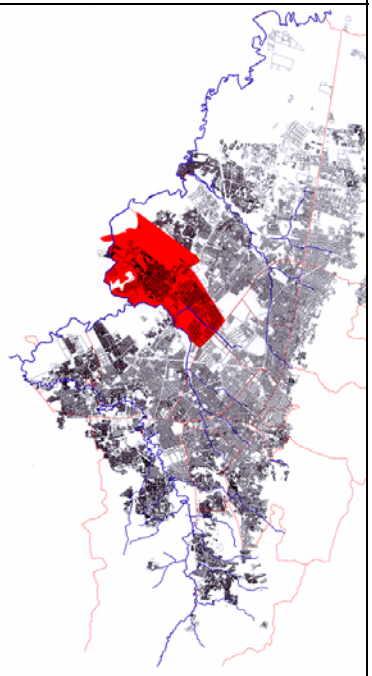
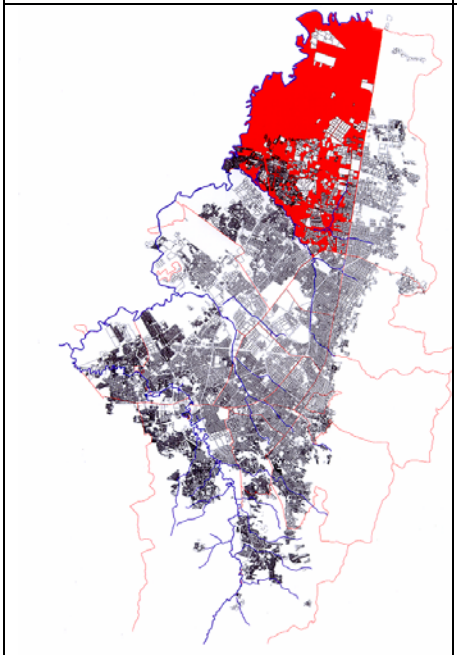
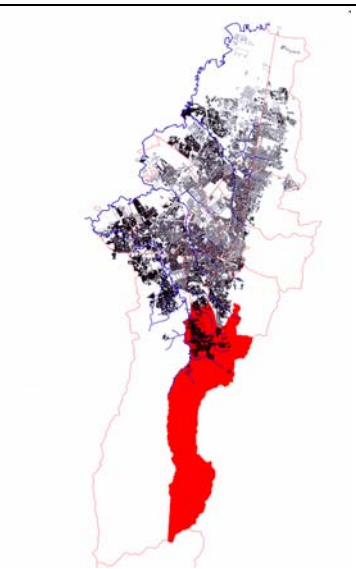
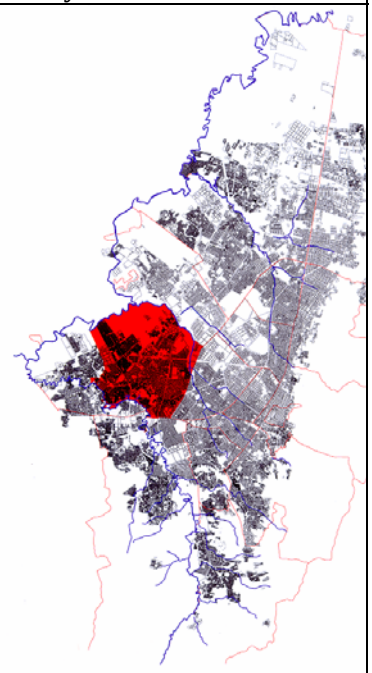
Source : Elaboration par l'auteur à partir des données de la LPRB

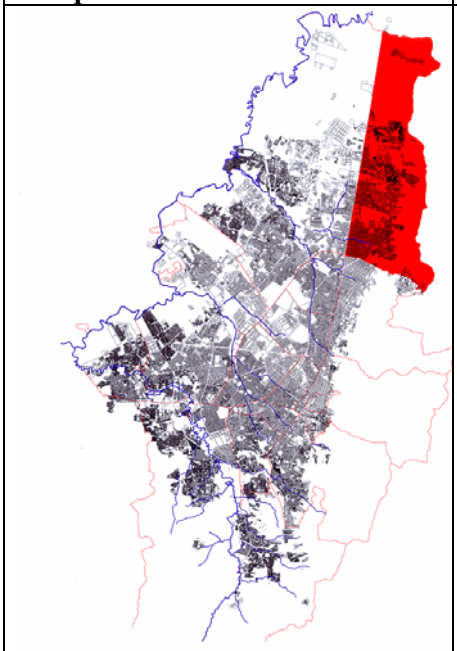
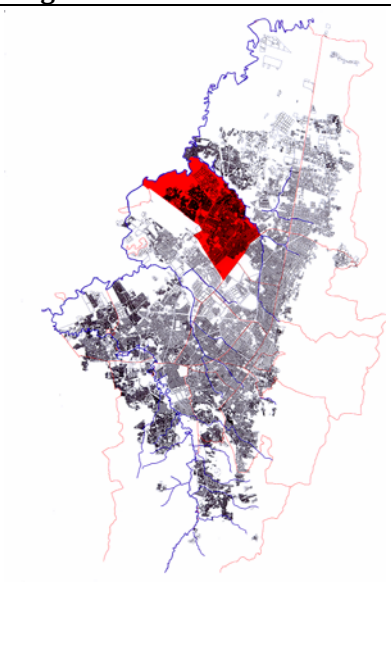
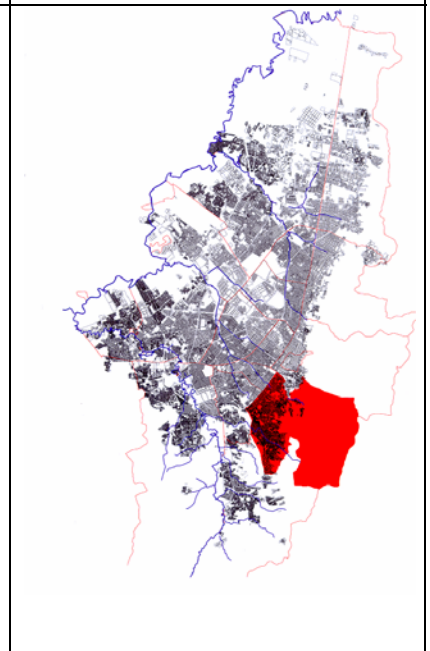
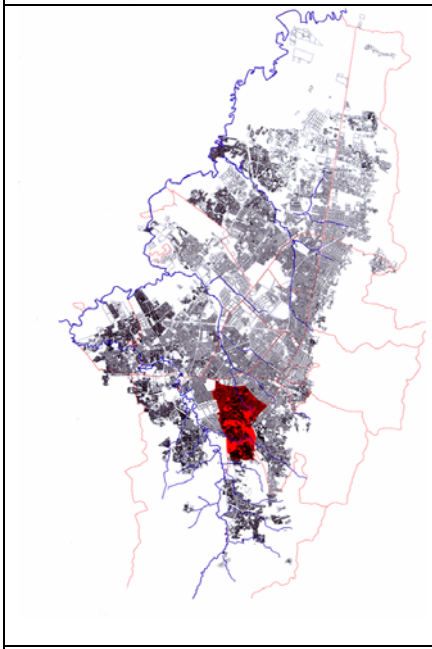
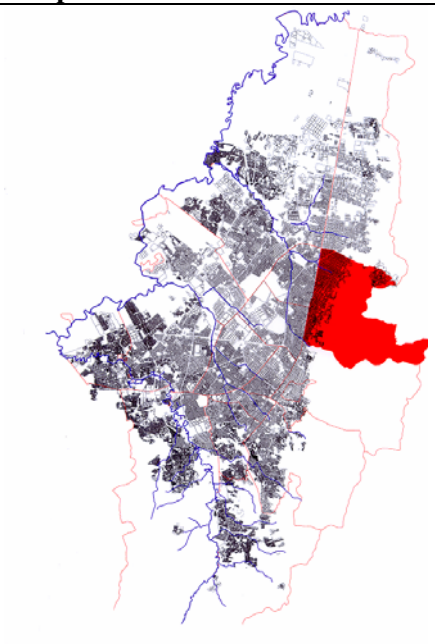
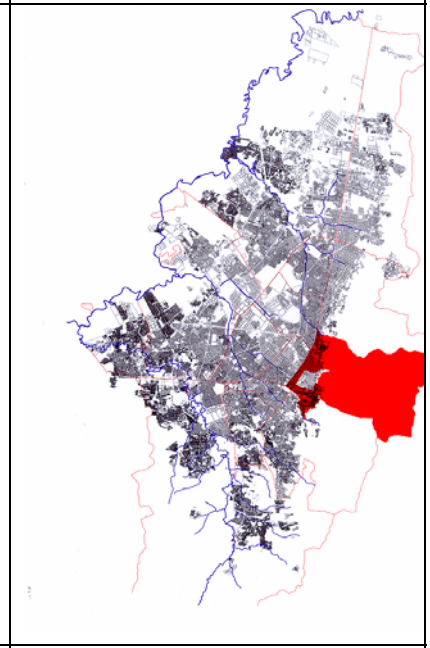
Annexe 9 : Caractéristiques des zones d'études affectées et non affectées par le TransMilenio (Chapitre 4, I.C.5)

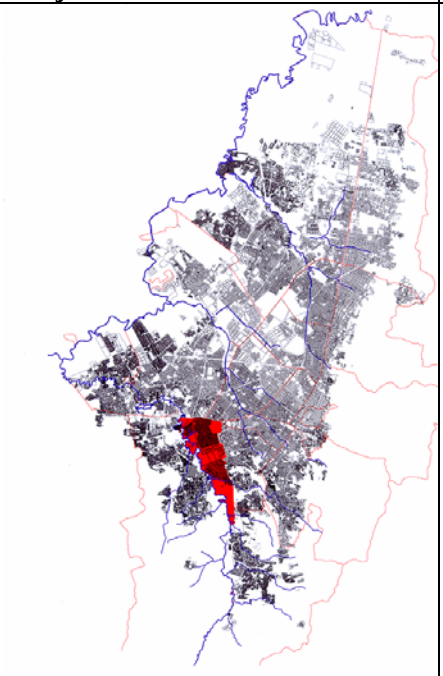
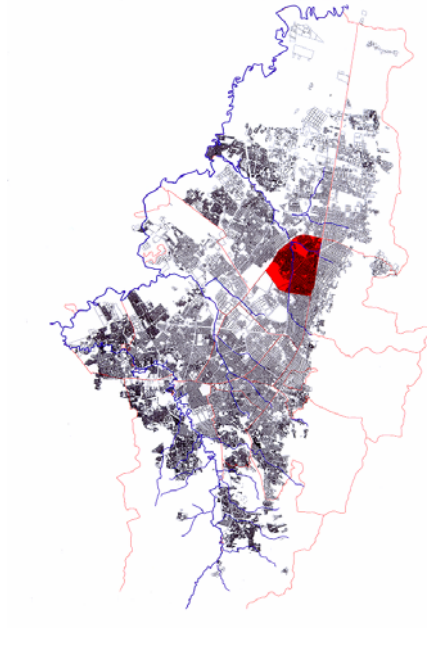
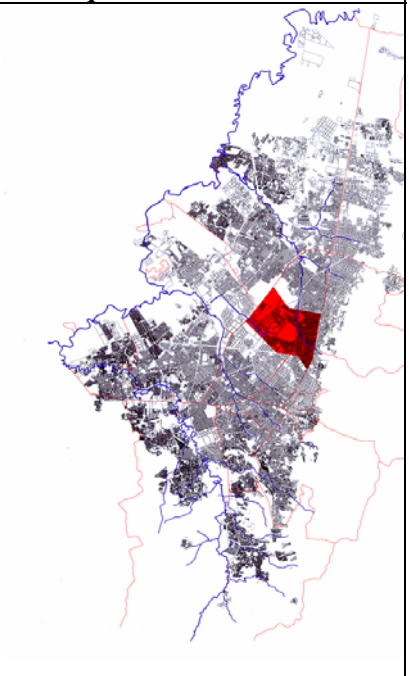
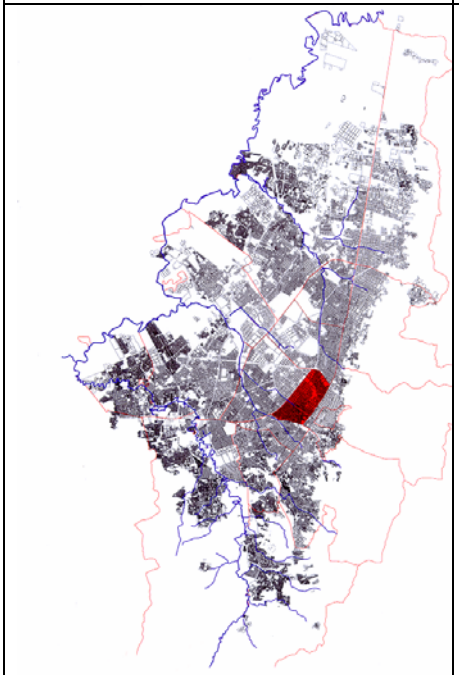
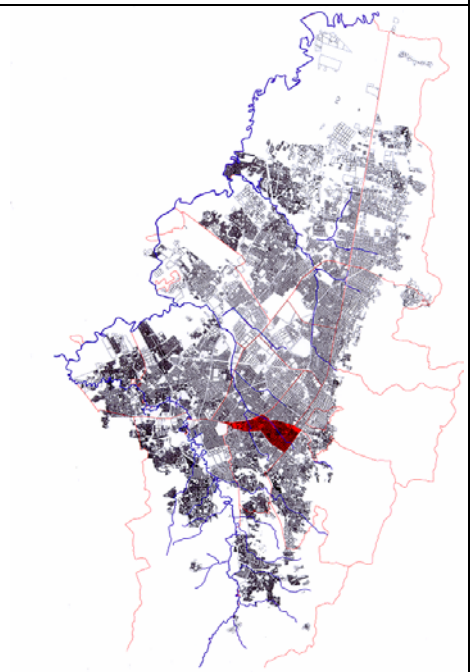
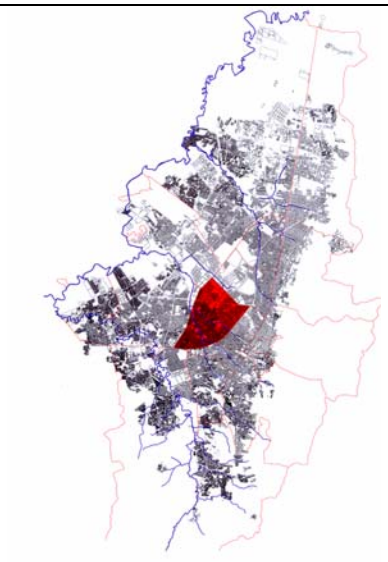
Zone	Localisation	Municipalité	*Estrato*	Usage du sol majoritaire
69	PUENTE LARGO – PASADENA; CLS 101 – 107; CRS 23 – 44	Suba	5	Résidentiel
71	NUEVA AUTOP. – CONTADOR – LAS MARGARITAS: CLS 134 – 151; AV 19 (TV 30) – AUTOP. NORTE (EXCL. EJES CIALES.)	Usaquen	4	Résidentiel
67	ALHAMBRA; CLS 109 – 116; TV 33C – CR 44	Suba	5	Résidentiel
73	LAS VILLAS; CLS 126 – 128D; CRS 48 – 51 C	Suba	4	Résidentiel

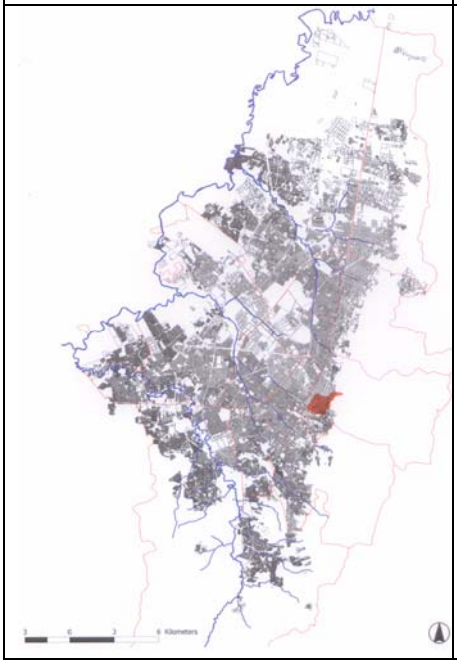
Source : Elaboration par l'auteur et M.I. Robles à partir des données de la Lonja de Propriedad Raiz de Bogota

Annexe 10 : Localisation spatiale des 19 localités du District de Bogota

Ciudad Bolivar	Bosa	Fontibon
		
Suba	**Usme**	**Kennedy**
		

Usaquen	Engativa	San Cristobal
		
Rafael Uribe	**Chapinero**	**Santa Fe**
		

Tunjuelito	Barrios Unidos	Teusaquillo
		
Los Martires	**Antonio Narino**	**Puente Aranda**
		

La Candelaria		
		

Source : Rodriguez, 2006

Annexe 11 : Exemples d'applications de TRANUS

Selon un rapport de l'Environmental Protection Agency (EPA, 2000) états-unienne, TRANUS était en 2000 le modèle intégré «Transport – Usages des sols» le plus appliqué dans le monde. Depuis 1990, TRANUS fut utilisé professionnellement dans plus de 30 agglomérations : 19 applications en Amérique Latine incluant de grandes métropoles comme Buenos Aires, Bogota, Lima, Caracas et Mexico, 3 aux Etats-Unis, 7 en Europe, et une au Japon.

A titre d'illustration, nous dressons ci-dessous une liste des principales applications urbaines (nous ne prenons pas en compte les applications aux niveaux régional et national) présentée sur le site internet de Modelistica :

Ville, Pays	Année	Applications
Sao Paulo, Brésil	Depuis 2005	Elaboration du Plan Intégral de Transport Urbain.
Recife, Brésil	Depuis 2005	Modélisation des systèmes d'usage des sols et de transport pour évaluation d'alternatives politiques et élaboration du Plan de Transport.
Ciudad Mexico, Mexique	2003-2004	- Evaluation de la demande de transport et insertion d'un corridor de bus en site propre (Axe 8, 26 km) - Evaluation financière des corridors de bus en site propre (axe 8 et Av. Insurgentes)
Maracaibo, Venezuela	2003	Insertion de la première ligne de métro à Maracaibo (2ème ville du Venezuela) : développement d'une base de donnée, simulation et évaluation de différents scénarii pour cette première ligne de métro.
Caracas, Venezuela	2003	Etude d'impact sur le transport de la première phase du développement de la zone résidentielle de l'université Centrale du Venezuela : modélisation du transit et du trafic, études d'alternatives.
Barcelona-Puerto La Cruz, Venezuela	2002-2003	Etude intégrale de transport: plan d'action stratégique à court, moyen et long terme.
Maracay, Venezuela	2001-2002	Etude intégrale de transport: plan d'action stratégique à court, moyen et long terme.
Valencia, Venezuela	2000-2002	- Développement de la base de donnée SIG, modélisation de différentes alternatives et évaluation économique - Etude pour le prolongement de la première ligne de métro - Evaluation économique et financière pour la concession d'une autoroute urbaine
Bogota, Colombie	2001-2002	Elaboration du plan d'urbanisme. Simulation des usages des sols et du transport, analyse d'alternatives futures de politiques urbaines et de transport
Inverness, Ecosse	2000	Modélisation et évaluation de différentes alternatives de développement urbain
Bogota, Colombie	1999-2000	- Evaluation de la demande de transport pour l'avenue logitudinale de l'occident. Analyse de différentes options pour sa concession. - Evaluation de la demande pour le métro. Modélisation et évaluation de 24 scenarii de politiques de transport public, incluant des

		corridors de bus et la première ligne de métro.
Buenos Aires, Argentine	1999	Etude pour l'intégration de la vallée basse et moyenne à la structure urbaine de Buenos Aires.
Valence, Espagne	1999	Modélisation intégrale des systèmes d'usage des sols et de transport. Evaluation d'alternatives de politiques urbaines.
Swindon, Angleterre	1998	Modélisation intégrale des systèmes d'usage des sols et de transport. Evaluation d'alternatives de politiques urbaines.
Baltimore, USA	1998	Modélisation intégrale des systèmes d'usage des sols et de transport. Evaluation d'alternatives de politiques urbaines.
Ciudad Panama, Panama	1998	Modélisation intégrale des systèmes d'usage des sols et de transport.
Bogota, Colombie	1997	Modélisation intégrale des systèmes d'usage des sols et de transport. Evaluation de la demande et de la faisabilité d'un système de transport de Masse.
Bruxelles, Belgique	1997	Modélisation intégrale des systèmes d'usage des sols et de transport. Evaluation de différents scenarii de politiques urbaines. Elaboration du plan IRIS. (partenaire STRATEC)
Lyon, France	1997	Conseil au CERTU pour modélisation intégrale des systèmes d'usage des sols et de transport.
Sacramento, USA	1996	Modélisation intégrale des systèmes d'usage des sols et de transport.
Maracaibo, Venezuela	1995	Elaboration du Plan de Transport
Valencia, Venezuela	1994	Evaluation économique et financière de la ligne de métro proposée. Evaluation des impacts sur les activités et les usages des sols. Elaboration de propositions.
Guanajuato, Mexique	1994	Elaboration du Plan de Transport. Réorganisation du schéma de circulation et du réseau de bus. Evaluation des projets routiers à long terme.
Maraicabo, Venezuela	1994	Evaluation de la faisabilité d'un métro.
Maracay, Venezuela	1993	Elaboration du Plan de Transport.
Madrid, Espagne	1989-1990	Etude de faisabilité d'un train urbain. Formation à la planification urbaine.
Caracas, Venezuela	1987	Evaluation de la demande pour l'extension de la ligne 2 du métro. Evaluation de l'impact urbanistique et socio-économique.
Curaçao	1985	Plan de développement urbain pour l'île. Simulation et évaluation des politiques alternatives d'usage des sols et de transport.

Source : www.modelistica.com

Bibliographie

Abraham, J., 1998, A review of the MEPLAN modelling framework from a perspective of urban economics, University of Calgary.

Abu Alkair, A., Glachant, M., 2006, Etalement urbain et gaz carbonique, document de travail CERNA.

Acero, H., Castelblanco, H., Delgado, C., Egurrola, L., Fonceca, A., Hernández, M., Osorio, R., Osorio, C., Romero, P., 1999, Alternativas de modelos de gestión de transporte urbano. Casos de estudio proyectos "Metro-TransMilenio. Universidad Piloto de Colombia. Bogotá.

Acevedo, J., Azuero, J., 1979, El desarrollo urbano y el transporte en Bogotá: Resumen de los principales estudios, Instituto Ser de Investigación. Bogotá.

Acevedo, J. 1980, Opciones del transporte en Bogotá, in Experiencia latinoamericana en el campo del transporte urbano colectivo. Medellín: Universidad de Medellín.

Acevedo, J., 1981, Un sistema eficiente para Bogotá, en Urrutia, M. (Editor) Buses y busetas: una evaluación del transporte urbano de Bogotá. Bogotá, FEDESARROLLO.

Acevedo, J., 1982, El metro y los buses en Bogotá, in Las cinco maravilla millonarias de Colombia. Bogotá, Oveja Negra.

Acevedo, J. Lozano, F., 1989, Estudio sobre la subvención; regulación y propiedad del transporte urbano de Bogotá. El desarrollo urbano y el transporte en Bogotá, resumen de los estudios principales, Bogotá, Fedesarrollo.

Acevedo, J., 1990, El transporte en Bogotá, en Santana. P. (Editor) Vivir en Bogotá. Bogotá, Ediciones Foro Nacional por Colombia, 1990, pp. 89-114.

Acevedo, J., 1991, El proceso decisorio del metro de Bogotá, in Figueroa, O., Padilla, L.A. Thomson, I. (Editores) V Congreso latinoamericano de transporte publico y V Congreso latinoamericano de transporte urbano. Santiago de Chile, CEPAL/REDES.

Acevedo, J., Salazar, M., 1992, Evaluacion del Proyecto de Construccion de un Metro para Bogotá, In Ernesto Guhl and Alvaro Pachón (Eds.) Transporte Masivo en Bogotá. DNP-Fonade-Ediciones Uniandes.

Acevedo, J., Salazar, J., Castañeda, W., 1993, El Metro De Medellin: Una Ilusión Costeada Por Todos Los Colombianos. Fonade, Instituto Ser.

Acevedo. J., 1994, El transporte en Bogotá, en Torres, P. (Editora) Soluciones al transporte en Bogotá. Bogotá, Sociedad Colombiana de Arquitectos Corporación LABORHABITAT.

Acevedo, J. 1994, Bases para una política integral de transporte urbano en Colombia, en Políticas e instituciones para el desarrollo urbano futuro en Colombia. Bogotá, Ministerios de Desarrollo Económico Departamento Nacional de Planeación.

Acevedo, J., 1996, La Troncal de la Caracas: Experiencia de una vía exclusiva para buses en Santa Fe de Bogotá, Paper presented at the 8th Latin American Congress of Public and Urban Transport (Clatpu), Curitiba, Brazil.

Acevedo, J., 1996, Transporte Urbano en Bogotá: Bases para una política integral, Foro Económico, Regional y Urbano. No. 3.

ADEME, 2006, Consommations conventionnelles de carburant et émissions de gaz carbonique des véhicules particuliers vendus en France. Agence d'environnement et de maîtrise de l'énergie.

ADEME, 2007, Bilan carbone Entreprises et Collectivités : Guide des facteurs d'émission. Calcul des facteurs d'émission et sources bibliographiques utilisées. Agence d'environnement et de maîtrise de l'énergie, Mission Interministérielle de l'effet de serre.

ADEME, 2007, Fiche conseil environnement énergies : quelles filières technologiques pour les autocars? Agence d'environnement et de maîtrise de l'énergie.

Alcaldía Mayor de Santa Fe de Bogotá, Departamento Administrativo de Planeación Distrital, 1998, Subdirección Económica de Competitividad e Innovación - Dinámica Urbana, Precios del Suelo Urbano y Formación de la Renta en Santa Fe de Bogotá, Bogotá.

Alcaldía Mayor de Santa Fe de Bogotá, Departamento Administrativo de Planeación Distrital, 2000, Plan de Ordenamiento Territorial, Bogotá.

Alcaldía Mayor de Santa Fe de Bogotá, Departamento Administrativo de Planeación Distrital, 2001, Generación, modelación y simulación del comportamiento de Escenarios de Desarrollo Urbano, construidos a partir de las definiciones estratégicas y de los proyectos viales, urbanísticos y de transporte, incluidos en el Plan de Ordenamiento Territorial para los diferentes horizontes del mismo, Informe Final Etapa 3: Ajuste de datos, calibración y tendencia, Bogotá.

Alcaldía Mayor de Santa Fe de Bogotá, Departamento Administrativo de Planeación Distrital, 2004, Documento Técnico de Soporte del Plan de Ordenamiento Territorial, Bogotá.

Alcaldía Mayor de Santa Fe de Bogotá, Departamento Administrativo de Planeación Distrital e Curadorias (2, 4, 5), 2003, Registro licencias expedidas (1994-2003), Bogotá.

Alcaldìa Mayor de Santa Fe de Bogotá, Departamento Técnico Administrativo de Medio Ambiente, 2002, Proyecto de Desarrollo de Servicios Urbanos para Bogotá, Componente Ambiental, Bogotá.

Allport, R., Thomson, J., 1989, Study of Mass Rapid Transit in Developing Countries, London, England.

Allport, R.J., 2000, World Bank Urban Transport Strategy Review-Mass Transit in Developing Countries, Position Paper, World Bank

Alonso, W.,1964, Location and Land use, Harvard University Press, Cambridge Press.

Amato, P.W., 1968, An analysis of the changing patterns of residential areas in Bogotá,

Colombia. Doctoral dissertation series. Cornell university - New York.

Anas, A.,1981, The estimation of multinomial logit models of joint location and mode travel choice from aggregated data, Journal of Regional Science, 21.

Anas, A., 1982, Residential location markets and urban transportation, New York, academic Press.

Anas, A., 1983, Discrete choice theory, information theory and the multinomial logit and gravity models, Transportation Research B, vol. 17B, n°1.

Anas, A., 1995, Capitalization of urban travel improvements into residential and commercial real estate : simulations with a unified model of housing, travel mode and shopping choices, Journal of Regional Science, Vol. 35, N°3.

Anderstig, C., Mattson, L ., 1991, An integrated model of residential and employment location in a metropolitan region, Papers in Regional Science, Vol. 70, N°2.

Anderstig, C., Mattson L., 1994, Modelling land-use and transport interaction : evaluation and policy analyses, Royal Institute of Technology, Stockholm.

Arango, G., 2001, La vivienda en Colombia en el cambio de siglo : herencias y retos.

Araque, A., Lopez, R., 2001, Los Precios del Suelo Urbano en Santa Fe de Bogotá 2001-2010: Las Plusvalías después del POT, Departamento Administrativo de Planeaciòn Distrital, Bogotá.

Ardila, A., 1995, Control de la congestión vehicular en Bogotá con herramientas microeconómicas. En : CEDE. Desarrollo y Sociedad 35.

Ardila, A., 1998, El problema de transporte de Bogotá : diagnóstico y perspectivas para el metro.

En : Debates de coyuntura económica 47. Fedesarrollo.

Ardila, A., Rodriguez, D.A., 2000, How Chaos Builds Ridership: Operations of an Exclusive Busway Carrying Over 35,000 Passengers Per Hour per Direction, Transportation Research Record, No. 1726.

Ardila, A., Menckhoff, G., 2002, Transportation Policies in Bogotá: Building a Transportation System for the People, Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board. No. 1817.

Ardila, A., 2004, Transit Planning in Curitiba and Bogota. Roles in Interaction, Risk and Change, Massachusetts Institute of Technology

Ardila, A., 2004, Transit Planning in Curitiba and Bogotá. Roles in Interaction, Risk, and Change, PhD Dissertation. Department of Urban Studies and Planning. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.

Arnaud, M., 1998, dynamique de l'urbanisation de l'Afrique au sud du Sahara, ISTED, Ministère des affaires étrangères – coopération et francophonie

Arnaud, M., 2004, Argumentaire en faveur du financement de l'investissement communal par l'emprunt dans les pays francophones d'Afrique et à Madagascar, note de travail.

Arnott, R.J., MacKinnon, J.G., 1977, Measuring the costs of height restrictions with a general equilibrium model, Regional Science and Urban Economics.

Ascher, F., 1995, Métapolis. L'avenir des villes, Éditions Odile Jacob

Ascher, F., 1998, La République contre la Ville : essai sur l'avenir de la France Urbaine, Edition de l'Aube.

Assmann, D., Sieber, N., 2005, Transport in Developing Countries : Renewable Energy versus Energy Reduction?, Transport Reviews Vol 25 n°6

Bae, C-H, 1993, Air quality and travel behavior – untying the knot Journal of the American Planning Association 59 65-74.

Bahrdt, H.P., 1969, Die moderne Großstadt. Hamburg.

Bairoch, P., 1996, De Jéricho à Mexico. Villes et Economie dans l'histoire, coll. Arcades, Gallimard, 2ème édition corrigée, Paris 1996 (première édition, Paris 1985).

Bajic, V., 1983, The Effect of a New Subway Line on Housing Prices in Metropolitan Toronto, Urban Studies, Vol. 20.

Banister, D., 1980 Transport mobility and deprivation in inner urban areas Saxon House, Farnborough

Banister, D., 1992 Energy use, transport and settlement patterns in Breheny M ed. Sustainable development and urban form Pion, London

Banister, D., Button, K., 1993, Transport, the environment and sustainable development E and FN Spon, London

de la Barra, T., 1982, Modelling regional energy use: a land use, transport and energy evaluation model. Environment and Planning B: Planning and Design 9.

de la Barra, T., Pérez, B. Vera, N., 1984, TRANUS-J: Putting large models into small computers, Environment and Planning B: Planning and Design. 11.

De la Barra, T., 1989, Integrated land use and transport modelling - Decision chains and hierarchies, Cambridge Urban and Architectural Studies. Cambridge University Press, Geat Britain.

de la Barra, T., 1998, Improved logit formulations for integrated land use, transport and environmental models, In Lundqvist, L., Mattsson, L.-G., Kim, T.J. (eds.): Network Infrastructure and the Urban Environment: Recent Advances in Land-Use/Transportation Modelling. Berlin/Heidelberg/New York, Springer.

de la Barra, 2004, Mobility, Location and land markets.

Barrios V., 2002, Influye la accesibilidad en la renta inmobiliaria: estudio del caso del sistema de transporte masivo TransMilenio, Universidad de Los Andes, tesi di laurea della Facoltà di Ingegneria, Prof. Hidalgo D., Bogotá.

Barter, P.A., 1999, An International Comparative Perspectiveon Urban Transport and Urban Form in Pacific Asia: Responses to the Challenge of Motorisation in Dense Cities. Perth: Murdoch University PhD Thesis.

Bates J., Brewer M., Hanson P., McDonald D., Simmonds D., 1993, Building a strategic model for Edinburgh, PTRC.

Bauer, G., Roux, J.M., 1976, La rurbanisation ou la ville éparpillée, Paris, Seuil

Beatley, T., 2000, Green Urbanism: Learning From European Cities.

Beaucire, F., 1996, Les transports publics et la ville, Milan

Beaucire, F., 2002, Sur la relation transport/urbanisme, Rapport PREDIT

Beaujeu-Garnier, 1995, Géographie urbaine, Armand Colin, collection U Géographie.

Becker, C.M., Mills, **E.S.**, 1986, Studies in Indian Urban Development. Washington DC,

World Bank.

Beckerich, C., 1997, Les prix des biens immobiliers et l'offre de biens publics locaux : un état de l'art de la capitalisation. XXXIII ème Colloque de l'ASRDLF - Renouveau régional - Renouveau urbain, Lille 1-3 septembre.

Bello, E., 2003, Generacion de alternativas viables hacia el desestimulo al uso del vehiculo privado en Bogotá, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

Bello, E., 2006, Analyse de la politique de transport dans une capitale mondiale : Bogota – Système TransMilenio, Memoire de Master Transport et Developpement Durable, dir. Beaucire, F., ENPC

Ben-Akiva, M., 1974, Structure of passenger travel demand models. Transportation Research Record 526.

Ben-Akiva, M., Lerman S., 1979, Disaggretate travel and mobility-choice and measures of accessibility ». in HENSHER D.A., STOPHER P.R. (Eds), Behavioral travel modelling. Croom Helm, London.

Ben-Akiva, M., Lerman, S., 1985, Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand, Cambridge, MA: MIT Press.

Bertaud, A., Renaud, B., 1992, Cities without Land Markets, Washington D.C. : World Bank,

Discussion paper n° 227.

Bertaud, A., Renaud, B., 1995, Cities without Land Markets : Location and Land Use in the Socialist

City, Washington, D.C. : World Bank, Policy Research Working Paper n° 1477.

Bertaud, A., Renaud, B., 1997, Socialist Cities without Land Markets, Journal of Urban Economics, vol.41, n° 1.

Bertaud, A. and Malpezzi, S., 1999, The spatial distribution of population in 35 world cities: the role of markets, planning, and topography, Working draft, February 17

Bertaud, A., 2001, Metropolis: A Mesure of the Spatial Organization of 7 Large Cities, http://alain-bertaud.com

Bertaud, A., Malpezzi, S., 2001, Measuring the Costs and Benefits of Urban Land Use Regulation: A Simple Model with an Application to Malaysia. Journal of Housing Economics.

Bertaud, A., Malpezzi, S., 2003, The Spatial Distribution of Population in 48 World Cities: Implications for Economies in Transition, University of Wisconsin.

Bertaud, A., Malpezzi, S., 2003, The Spatial Distribution of Population in 48 World Cities: Implications for economies in transition, Unpublished paper.

Bertaud, A., 2003, The Spatial Organization of cities: Deliberate outcome or unforeseen consequence?.

Bertaud, A., 2004, The Spatial Organization of Cities: Deliberate Outcome or Unforeseen Consequence?, World Development Report 2003, Washington, DC.: World Bank, Background Paper, http://alain-bertaud.com

Bertaud, A., Brueckner., **J.,** 2004. Analyzing Building Height Restrictions:Predicted Impacts, Welfare Costs, and a Case study of Bangalore, India**.** Forthcoming, Regional Science and Urban Economics

Best Foot Forward, 2002, A resource flow and ecological footprint analysis of Greater London

Bonnafous A., 1993, Prospective de la mobilité urbaine, in Bonnafous A., Bussière Y (eds). Transport et étalement urbain : les enjeux. Programme Rhône-Alpes, Recherches en Sciences Humaines, Les chemins de la recherche, Oullins.

Bonnafous, A., Tabourin, E., 1998, Modélisation de l'évolution des densités urbaines, in Données urbaines II D. PUMAIN et M.F. MATTEI (dir.), Paris, Anthropos, coll. villes

Bonnafous, A., Plassard, F., Vulin, B., 1993, Circuler demain. Paris DATAR/Editions de l'aube, Collection Monde en cours.

Bonnafous, A., 1972, La logique de l'investigation économétrique. Thèse pour le Doctorat ès-Sciences Economiques, Université Lumière Lyon 2, Lyon.

Bonnel, P., 1994, Politiques de déplacements urbains en Europe: analyse comparative Espagne, France, Grande Bretagne, Italie, Norvege, Suisse, en Communication aux journées de formation à l'ENPC.

Bonnel, P., 1995, Urban car policy in Europe en Transport Policy, Vol. 2 No. 2.

Bonnet, J.,1994, Les grandes métropoles mondiales, Géographie d'aujourd'hui, Nathan Université

Bose, A., 1980, India's Urbanisation: 1901-2001. New Delhi, Tata McGraw-Hill.

Boulanger, PM, 2004, Les indicateurs de développement durable : un défi scientifique, un enjeu démocratique, Institut pour le Développement Durable, Belgique.

Bourne, L., 1992, Self-fulfilling prophecies ? Decentralization, inner city decline, and the quality of urban life, Journal of the American Planning Association 58.

Boutaud, A., 2002, Elaboration de critères et Indicateurs de Développement Durable (CIDD) pour les collectivités locales, Thèse de doctorat en sciences de la terre, Ecole des Mines de Saint Etienne / centre SITE, Rapport ADEME n°1

Bouziane Semmoud, 2001, Introduction à la géographie des grandes villes, Cours de géograhie, préparation CAPES et Agrégations d'Histoire et de Géographie, Edition Du Temps.

Bovy, P., 1992, Transport and the environment. A tentative overview of issues in cities of developpement and deloveloping countries, en Godard, X. (Editor) Mobilité et transports dans les villes en développement: transferts de modèles et échanges économiques nord sud. París, l'Harmattan/CODATU.

Bovy, P., 2000, Planification Intégrée "Urbanisme – Transport" et Développement Durable des Mobilités, UITP

Breheny, M., 1991, Contradictions of the Compact City, Town&Country Planning 60

Breheny M., 1992, the Contradictions of the Compact City : a review, in Breheny M., (Ed) Suatainable Development and Urban Form, European Research in Regional Science, 2, Pion, London.

Breheny, M., Cappellin, R., Maggi, R., Parr, J.B., Vickerman, R., 1992, Sustainable Development and Urban Form, European Research in Regional Science, Series Editor P.W.J. Batey, Pion Limited

Breheny, M., 1994, The compact city and transport energy consumption, Transactions of the Institute of British Geographers, New Series, Vol. 20, No. 1.

Breheny M., 1995, Transport Planning, energy and development : improving our understanding of the basic relationships, in Bannister D. (Ed) Transport and Urban Development, E.&F. N., Spon, London

Bretagnolle, A., 1999, Les systèmes de villes dans l'espace-temps : effets de l'accroissement des vitesses de déplacement sur la taille et l'espacement des villes, thèse de doctorat en géographie, Université de Paris I

Brinckerhoff, P., 1996, Consultant recommendations for the development of phase II databases, models and forecasting methods.

Bruekner, J., 2000, "Urban Sprawl Diagnosis and Remedies." International Regional Science Review, 23.

Burgess, E., Park, R., McKenzie,R., 1925, The City, University of Chicago Press.

Bussiere, R., 1975, Interaction urbaine. Le modèle de la CRU, Annales 1975, Paris, Centre de recherche d'urbanisme.

Cabal, C., Gatignol, C., 2004, Rapport sur la définition et les implications du concept de voiture propre. Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques.

Calthorpe, P., 1993, The Next American Metropolis: Ecology, Community, and the American Dream. New York: Princeton Architectural Press.

Camagni R., 1996, Principes et modèles de l'économie urbaine. Bibliothèque de Science Régionale, ASRDLF, Economica, Paris.

Camagni, R. et al, 2002, Formes urbaines et mobilité : les coûts collectifs des différents types d'extension urbaine de l'agglomération milanaise, Revue d'Economie Régionale et Urbaine.

Campbell, C.J., 1991, The golden century of oil 1950-2050: The depletion of a resource. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Campbell, C. J., Laherrere, J H., 1995, The World's Oil Supply 1930-2050. Geneva: Petroconsultants.

Capozza D., 1973, Subways and land use, Environment and Planning, n°5.

Castells, M., 1977, The Urban Question, London, Edward Arnold.

Centro Andino para la Economía en el Medio Ambiente, 2003, Reducción de emisiones sistema TransMilenio, Seminario Taller, Bogotá.

Cervero, R., 1994, Rail Transit and Joint Development: Land Market Impacts in Washington, DC and Atlanta, Journal of the American Planning Association, Vol. 60, No. 1.

Cervero, R., 1994, Transit-based housing in California: evidence on ridership impacts, Transport Policy, vol. 1, n° 3.

Cervero, R., Seskin, 1995, An Evaluation of the Relationship Between Transit and Urban Form, Research Results Digest, Transit Cooperative Research Program, n° 7, juin.

Cervero, R., Kockelman, K., 1997, Travel demand and the 3Ds : density, diversity and design, Transportation Research part D, vol. 2, n° 3.

Cervero, R., 1998, The Transit Metropolis: A Global Inquiry. Washington DC: Island Press.

Cervero, R., 2001, Efficient Urbanisation : Economic Performance and the Shape of the Metropolis, Urban Studies, vol. 38, n° 10.

Cervero, R., 2001, Transport and land use: key Sigues in Metropolitan Planning and Smart Grown, en: Australian Planner. Vol. 38, no 1.

Cervero, R., 2002, Built environment and mode choice: toward a normative framework, Transportation research part D, vol. 7, n° 4.

Chaline, C., 2003, Les politiques de la ville, Paris PUF, seconde édition, 115 p.

Chapin, F.S., 1965, Urban Land Use Planning, Urbana, University of Illinois Press.

Chapin, F.S., Weiss S.F., 1968, A probabilistic model for residential growth, Transportation Research 2.

Chand, M., Puri, V.K., 1983, Regional Planning in India: The process of Urbanization in India. New Delhi, Allied Publishers.

Chaparro, I., 2002, Evaluacion del impacto socioeconomico del transporte urbano en la ciudad de Bogota. El caso del sistema de transporte masivo, TransMilenio, Naciones Unidas, CEPAL, Division Recursos Naturales e Infraestructura, Unidad de Transporte, Santiago de Chile.

Chinitz, B., 1990, Growth management: good for the town, bad for the nation? Journal of the American Planning Association.

Choay, F., 1994, Le règne de l'urbain et la mort de la ville, in J. Dethier et A. Guiheux (dir.), La ville, art et architecture en Europe, 1870 - 1993, éditions du Centre Pompidou, Paris, p. 26-35.

Chodai Co., Ltd, Yachiyo Engineering Co., LTD, 1996, The study on the master plan for urban transport of Santafé de Bogotá in Republic of Colombia (main report) Japan International Cooperation Agency (JICA) The Republic of Colombia.

Chodai Co., Ltd, Yachiyo Engineering Co., LTD, 1995, The study on the master plan for urban transport of Santafé de Bogotá in Republic of Colombia (study progress paper) Japan International Cooperation Agency (JICA) The Republic of Colombia.

Chomentowski, V., Magnard, R., O'Neill, D., 2005, Les finances de cinq villes nouvelles Cergy-Pontoise, Evry, Isle d'Abeau, Saint-Quentin-en-Yvelines, Sénart. Synthèse des monographies 1973-2003. Programme d'histoire des villes nouvelles, Paris.

Clark, C., 1951, Urban population densities, Royal of the royal Statistical Society serie A, n°114.

Clement, L., 1996, Review of existing land-use transport models, Centre d'Etude sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques (CERTU).

Coing, H., 1981, Crise des transports urbians et transports « non conventionnels », in ENDA Document Tiers-Monde Transports en sursis? Quelle des « petits transports » urbains dans le Tiers-Monde?, N°13.

Coing, H., Lara, P. Montano, I., 1989, Privatisation et régulation des services urbains; une étude comparative. París, LATTS ENPC.

Comby, J., 2000, le cadastre contre la propriété.

Comite de Expertos, 1995, Acciones de Corto y Mediano Plazo para Atacar la Congestion en Bogota. Bogota

Commission of the European Communities 1990 Green paper on the urban environment European Commission, Brussels

Commission of the European Communities 1992 The impact of transport on the urban environment European Commission, Brussels

CONPES, 1991, Bogotá. Constitución Política de Colombia, Conpes 2999.

CONPES, 1998, Sistema de Servicio Público Urbano de Transporte Masivo de Pasajeros de Bogotá, Documento Conpes 3093. Bogotá.

CONPES (Consejo Nacional de Política Económica y Social), 2000, Sistema de Servicio Publico Urbano de Transporte Masivo de Pasajeros de Bogota –Seguimiento-, Departamento Nacional de Planeación, Documento No. 3093.

CONPES, 2000, Términos para la participación de la Nación en el proyecto del Sistema de Servicio Público Urbano de Transporte Masivo de Pasajeros para la ciudad de Santa Fe de Bogotá.

CONPES, 2002, Propuesta para mejorar la movilidad entre Bogota y Soacha: extensión de la troncal Norte-Quito-Sur del Sistema TransMilenio, documento CONPES 3185.

CONPES, 2005, Sistema Integrado del Servicio Publico Urbano de Transporte Masivo de Pasajeros del Municipo de Soacha como una Extensión de la Troncal Norte-Quito-Sur del Sistema TransMilenio – Seguimiento, documento CONPES 3404.

Corner, M.C., 1999, L'espace périurbain, une nouvelle forme de l'expansion urbaine, thèse de doctorat en géographie, Université de Bourgogne

Cortes, F., Del Castillo, J.C., 1994, La planeación urbana frente a las nuevas formas de crecimiento físico de la ciudad, in Políticas e instituciones para el desarrollo urbano futuro en Colombia. Bogotá, Ministerios de Desarrollo Económico Departamento Nacional de Planeación Programa.

Cortés, R., 1995, Del urbanismo a la planeación en Bogotá (1900-1990), Paper. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia.

Coslor, E., 2000, Urban Sprawl and Atlanta's air quality problems.

Council for the Protection of Rural England, 1992, The lost land Council for the Protection of Rural England, London.

Council for the Protection of Rural England, 1993, The regional lost land Council for the Protection of Rural England, London.

Cour, J.M., 1998, Perspectives à long terme de l'Afrique de l'Ouest (WALTPS), Organisation de coopération et de développement économique (OCDE)

Cour, J.-M. 2005, Investissements de peuplement et d'urbanisation, besoins de financement et implications pour la coopération internationale ». Téléchargeable sur le site de l'IDDRI : http://www.iddri.org/iddri/telecharge/services/05_6_cour.pdf

Crecine, J.P., 1968, A Dynamic Model of Urban Structure. P-3803, RAND Corporation: Santa Monica, Ca.

Crozet, Y., Orfeuil, J.P., Massot, M.H., « groupe de Batz », 2001, Mobilité urbaine : cinq scénarios pour un débat, [en ligne], Note du CPSV, n° 16, Paris : DRAST.

Crozet, Y., 2002, Prospective pour une mobilité durable, Conférence prononcée le 14 mai 2002, Transports,

n°416.

Crozet, Y., Joly, I., 2003, De l'hypothèse de la constance des budget temps de transport à sa remise en cause: Une double interpellation des politiques de transport urbain, Document prepare pour le PUCA, décembre.

Cuervo, B., Molina, M.O. Rojas, L.H., 1990, Hacia una utilización racional del sistema vial en Bogotá. Universidad Nacional de Colombia, P.F. Diploma de Ingeniería, Facultad de Ingeniería.

Cuervo, L.M., Jaramillo, S., 1987, La configuración del espacio regional en Colombia : tres ensayos. Bogotá : CEDE.

Cuervo, L.M., 1995, Algunas tendencias de la movilidad territorial en Bogotá, en Dureau, F. (Editora) Las nuevas formas de movilidad de las poblaciones urbanas en América latina. Bogotá, CEDE Universidad de los Andes.

Darbéra, R., 2003, L'efficacité énergétique dans les transports, Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie (IEPF), fiche technique n°2

Debreu, G., 1960, Review of R.D.Luce, Individual Choice Behavior : a Theoretical Analysis, American Economic Review, 50.

Departamento Administrativo de Planeacion Distrital (DAPD), 1998, Area Movilidad Urbana del Plan de Desarrollo "Por la Bogotá que Queremos".

Departamento Administrativo de Planeacion Distrital (DAPD), 2005, Observatorio de precios del suelo. Volumen I, Bogotá: Gráficas Colombia Ltda.

Departamento Administrativo de Planeacion Distrital (DAPD), 2005, Observatorio de precios del suelo. Volumen II, Bogotá: Gráficas Colombia Ltda.

Departamento Administrativo de Planeacion Distrital (DAPD) - Alcaldía Mayor de Bogotá, 2000, Plan de Ordenamiento Territorial de Santa fe de Bogotá – Documento Técnico de Soporte. Decreto No.1110 del 28 de Dic. de 2000. Alcaldía Mayor de Bogotá, Bogotá, Colombia

Department of the Environment, 1993, Sustainable development: the UK strategy Cmnd 2426 HMSO, London.

Derycke, P. H., 1979, Economie et planification urbaine, tome 1. Paris. PUF.

Derycke P.H., 1982, Economie et planification urbaines - Tome 2 : Théories et modèles, Collection Themis Sciences Economiques, PUF.

Derycke P.H., Gannon F., 1990, Distance et coûts de transports. Quelques réflexions sur les politiques de réduction de la congestion urbaine, Revue d'Economie Régionale et Urbaine, N°2.

Deymier, G., Nicolas, J.P., 2005, Modèles d'interaction entre transport et urbanisme : état de l'art et choix du modèle pour le projet SIMBAD, Rapport intermédiaire n°1 du projet Simbad, Rapport du LET pour le compte de la DRAST et de l'ADEME dans le cadre du groupe 11 du PREDIT.

Dial, R., 1971, A probabilistic multi-path traffic assignement model that obviates path enumeration, Transport Research, 5.

Didelon , C., 2003, Bangalore, ville des nouvelles technologies, Mappemonde, 70, Paris.

Domencich, T.A., McFadden , D.L, 1975, Urban travel demand : a behavioral Analysis, North-Holland, Amsterdam.

Duarte, Guterman & Cia, 2006. Plan Maestro de Movilidad.

Duchier, D., 1991, Revue méthodologique des modèles interactifs de localisation des activités et de transport. Mémoire pour le D.E.A. d'Economie des Transports, LET.

Dupuy, G., 1995 La ville et l'automobile, Paris, Flamarion Edition, New York: Guilford.

Dupuy, G., 1987, Vers une théorie territoriale des réseaux: une application aux transports urbains en Annales de Géographie, N°538.

Dupuy, G., 1991, L'urbanisme des réseaux. París, Colección U, Armand Colin.

Dupuy, G., 1995, Les territoires de l'automobile. París, Colección Villes, Anthropos.

Dureau, F., Barbary, O., Florez, C.E., 1993, La Movilidad de las poblaciones y su impacto sobre la dinámica del área metropolitana de Bogotá, Documento de trabajo n°3, Resultados preliminarios de la encuesta cuantitativa. Bogotá, Orstom-CEDE.

Dureau, F., Hoyos, M.C. Florez, E.C., 1994, Las formas de movilidad de la población de Bogotá y su impacto sobre la dinámica del área metropolitana: metodología de un sistema de encuesta en Desarrollo y Sociedad, N°34, septiembre, 1994, pp. 73-94.

Dureau, F., Hoyos, M.C. Florez, E.C., 1994, Soacha: un barrio de Bogotá. Movilidad y acceso a la vivienda de las poblaciones de los Sectores Orientales del Municipio en Desarrollo y Sociedad, N°34.

Dureau, F., Florez, C. E., 1994, Soacha : un barrio de Bogotá. En : CEDE.Desarrollo y sociedad 34.

Dureau, F., Florez, C. E., Hoyos, M. C., 1994, Las formas de movilidad de la población de Bogotá y su impacto sobre la dinámica del área metropolitana : metodología de un sistema de encuestas. En : CEDE. Desarrollo y sociedad.

Dureau, F., Lulle, T., Parias, A., 1995, Interactions entre politiques urbaines, marché du logement et comportements résidentielles: leur rôle dans les transformations des quartiers aisés de Bogotá, Coloquio Les pratiques de la ville. Transformations sociales et évolutions spatiales, París, CRH/PIR-Villes.

Dureau, F., Florez, C.E. 1996, Dynamiques démographiques colombiennes: du national au local, en La Colombie à l'aube du troisième millénaire. Blanquer, Jm. y Gros, C. (Editores) París, Iheal.

Dureau, F., Pissoat, O., 1996, En mapas : las evoluciones socioespaciales de Bogotá y su contexto 1973 - 1993. Documento CEDE 05.

Dureau, F., 1997, Trajectoires résidentielles et recompositions urbaines à Bogotá (Colombie)**,** en Cahiers des Amériques Latine_ N° 22.

Dureau, F., Lulle, T., Parias, A., 1997, Transformaciones de los barrios de clase alta en Bogotá : nuevas lógicas residenciales. En : La investigación urbana y regional en Colombia. Santafé de Bogotá : Carlos Valencia editores.

Dureau, F., Lulle, T., 1999, Movilidad espacial y transformaciones territoriales enBogotá. Documento CEDE 11.

Dureau, F., Dupont, V., lelievre, E., Levy, J.P., Lulle, T., 2000, Métropoles en mouvement : une comparaison internationale. Paris (FRA) ; Paris : Anthropos ; IRD,

Dutton, J.A., 2001, New American Urbanism: Re-Forming the Suburban Metropolis, Skira Architecture Library

ECOTEC, 1993 Reducing transport emissions through ability in Breheny M ed. Sustainable development and planning HMSO, London urban form Pion, London.

EEA, 1999, Environmental indicators : typology and overview, European Environment Agency, Technical report n°25, Copenhagen

EPA, 2000, Projecting Land-Use Change : a summary of models for assessing the effects of community growth and change on land-use patterns, EPA/600/R-00/098.

EXPLICIT, 2002, Bilan Energétique de l'Agglomération Grenobloise, ALE Grenoble

European Commission, Eurostat, 1998, Towards Environmental Pressure Indicators for the EU, Luxembourg.

Fainboim, I., Alonso, J., Rodríguez, C., 1998, Metros en Colombia: mitos y realidades, Debates de Coyuntura Económica, No. 47, Fedesarrollo, Bogotá.

Fainboim, I., Rodríguez, C., 2000, Crisis fiscal y financiación del metro de Bogotá, In Ricardo Montezuma (Ed.). "Presente y futuro de la movilidad urbana en Bogotá: Retos y Realidades. Veeduría Distrital. Bogotá.

Faucheux, S., 2005, Économie et politique des changements climatiques, La découverte, Coll. Repères, Paris.

Fernandez Bremauntz, A., 2004, General Direction for Research on Urban Regional and Global Pollution, INE-SEMARNAT, The Global Forum on Sustainable Development: Development and Climate Change.

Ferras, R., 1977, Barcelone, éditions Anthropos.

Fouchier, V., Merlin, P., 1994, Les fortes densités urbaines : une solution pour nos villes ?, Hong Kong : ADST.

Fouchier, V., 1995, La densification : une comparaison internationale entre politiques contrastées, Les Annales de la Recherche Urbaine, n° 67.

Fouchier, V., 1996, Quel transport, pour quelle ville ? Urbanisme, n°289)

Fouchier, V., 1996, Quel transport, pour quelle ville ?, Urbanisme, n° 289.

Fouchier, V., 1997, Des fortes densités urbaines. Les villes nouvelles dans l'espace métropolitain, Thèse d'Etat en Urbanisme réalisée sous la direction du Pr. Pierre Merlin, Université de Paris VIII.

Fouchier, V., 1997, Les densités urbaines et le développement durable. Le cas de l'Ile-de-France et des villes nouvelles, Paris : Editions du SGVN.

Fouchier, V., 1998, La densité humaine nette : un indicateur d'intensité urbaine, in Pumain, Mattei, Données Urbaines (Vol. 2), Paris : Anthropos.

Fouchier, V., 1999, Maîtriser l'étalement urbain : une première évaluation des politiques menées dans quatre pays, in 2001 plus, n° 49, Centre de prospective et de veille scientifique, ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement.

Fouchier, V., 1999, Maîtriser l'étalement urbain : une première évaluation des politiques menées dans quatre pays (Angleterre, Norvège, Pays Bas, Hong Kong), 2001 Plus, n° 49.

Frey, H., 1999, Designing the city : towards a more sustainable form, London, Routledge.

Fujita, M., Ogawa, H., 1982, Multiple equilibria and structural transition in nonmonocentric urban configurations, Regional Science and Urban Economics, vol. 12, n° 2.

Fujita, M. 1988, A Monopolistic Competition Model of Spatial Agglomeration, Regional Science and Urban Economics, vol. 18, n° 1.

Fujita M., Ogawa F., 1989, Nonmonocentric urban configuration in a two-dimensional space. Environnement and planning A, 21.

Fujita, M., 1989, Urban Economic theory. Land use and city size, Cambridge : Cambridge University Press.

Fujita, M., Dapeng Hu, 2001, Regional Disparity in China 1985-94: The Effects of Globalization and Economic Liberalization, Annals of Regional Science , vol. 35, n° 1.

Fulton, W., 1996, The New Urbanism : Hope or Hype for the American Communities ?, Cambridge MA : Lincoln Institute of Land Policy.

Fulton, L., 2002. Bus Systems for the Future, Achieving Sustainable Transport Worldwide. International Energy Agency. Paris: IEA Books

Fulton, L., 2002. Bus Systems for the Future, Achieving Sustainable Transport Worldwide. International Energy Agency. Paris: IEA Books

Fustier, B., 1988, Les interactions spatiales, in Ponsard Claude. Analyse économique spatiale. P.U.F., Paris.

Gakenheimer, R., 1985, An Addendum to "Planning, Organizations and Decision-making: a Research Agenda." Transportation Research. Vol. 19a, No. 5/6.

Gakenheimer, R., 1994, Experiencias internacionales en la gestión del transporte urbano, en Politicas e instituciones para el desarrollo urbano futuro en Colombia. Bogotá, Ministerios de Desarrollo Económico Departamento Nacional de PlaneaciónPrograma.

Gakenheimer, R., 1995, Shaping the Future: the Role of Urban Transportation Planning, in China's Urban Transport Development Strategies. The World Bank.

Gakenheimer, R., 1997, Mobility issue in developing countries, Working paper, Department of Urban Studies and Planning, Massachusetts Institute of Technology.

Gakenheimer, R., 1998, Special Prospects for Mobility Enhancement in Cities of the Developing World: the Performance of Land Use Planning and High Volume Public Transport. The Cooperative Mobility Program, MIT. Working Paper 98-5-2.

Galvez, T., 2002, The powit model, Revista Urbana 30.

Gannon F., 1992, Modèles de la ville et politiques urbaines optimales, Thèse pour le Doctorat ès Sciences Economiques, Université Paris X Nanterre, Paris.

Garin, P., 1966, A Matrix Formulation of the Lowry Model for Intra-Metropolitan Activity Location, Journal of the American Institute of Planners 32.

Garza Puentes, N., Montana Rivera, J., 2000, Crecimiento urbano de Bogota en un contexto especulativo, Lincoln Institute research Report.

General Motors, 2002, Well-to-wheel analysis of energy use and greenhouse gas emissions of advanced fuel / vehicle systems - a European study. Septembre 2002.

Giddens, A., 1994. Temps et espace dans le monde contemporaine, in Les conséquences de la modernité . Paris, L'Harmattan. (Traduction française de A. Giddens, The Consequences of Modernity. Californie, Stanford University Press.)

Gilbert, A., Ward, P., 1985, Housing, the State, the poor : policies and practicies in three

latinoamerican cities. Cambridge university press.

Gilbert, A., 1997, ¿Que hacer con la vivienda en el tercer mundo? En : La investigación urbana y

regional en Colombia. Santafé de Bogotá : Carlos Valencia editores,.

Gilbert, A., Dávila, J., 2002, Bogotá: Progress Within a Hostile Environment." In Henry Dietz and David J. Myers (Eds.) Capital City Politics in Latin America. Lynne Rienner Publishers.

Giraldo, F., Lopez, H., 1987, El UPAC, la política económica y la construcción 1970-1987.

Bogotá : CAMACOL.

Giraldo, F., Gonzales, H., 1988, Algunas dimensiones del desarrollo de Bogotá, in Bogotá 450 años, Retos y Realidades. Bogotá. Foro Nacional por Colombia, IFEA.

Giraud,P.-N., Lefevre, B., Maria, A., Ruet, J., 2006, Le financement des services essentiels dans les villes pauvres, « Revue d'économie financière » 09/2006.

Giraud,P.-N., Lefevre, B., Maria, A., Ruet, J., 2006, Innovations dans le financement des services essentiels dans les villes pauvres, « Revue d'économie financière » 09/2006.

Giraud, P.N., Lefèvre, B., 2006, Les défis énergétiques de la croissance urbaine au sud. Le couple «Transport – Urbanisme» au cœur des dynamiques urbaines, rapport AFD - IDDRI : « Regards sur la terre ».

Giraud, P.N., Lefèvre, B., 2006, Signature Energétique des Transports Urbains (SETU), un outil de suivi-évaluation de la durabilité des dynamiques urbaines, Rapport Final pour le programme D2RT-MEDD / PUCA, Politiques Territoriales et Développement Durable.

Godard O., 1996, le développement durable et le devenir des villes : bonnes intentions et fausses idées, Futuribles, n°208.

Godard, X, Teurnier, P. 1992, Le transports urbains en Afrique à l'heure de l'ajustement, Redéfinir le service public. París, l'Harmattan/Inrets.

Godard, X., 2005, Kyoto et la double trappe dans laquelle tombe le transport collectif, RTS review.

Goffette-Nagot, T F., 1994, Analyse micro-économique de la périurbanisation : un modèle de localisation résidentielle, Document de recherche N°43 (Série Thèse). INRA, Dijon.

Goffman, E., 1959, Behavior in Public Places: Notes on the Social Organization of Gatherings, New York, The Free Press.

Golob, T., Brownstone, D., 2005, The impact of residential density on vehicle usage and energy consumption, working paper EPE-011, University of California Energy Institute

Gomez, J., 1991, A global view of automobile dependence - review of P Newman and J Kenworthy Cities and automobile dependence: a sourcebook Journal of the American Planning Association.

Gómez, J., 2004, TRANSMILENIO S.A. y Alcaldía Mayor de Bogotá, TransMilenio la joya de Bogotá. Bogotá: Panamericana Formas e Impresiones S.A.

Gordon P., Kumar A., Richardson W., 1988, Beyond the Journey to work, Transp. Res. 22A

Gordon P., Kumar A., Richardson W., 1989, Congestion, Changing Metropolitan Travel Behaviour, Reg. Studies 23.

Gordon, P., Kumar, A., Richardson, H., 1989, Congestion, changing metropolitan structure, and city size in the United States International Regional Science Review.

Gordon, P., Richardson, H., 1989, Gasoline consumption and cities - a reply Journal of the American Planning Association, vol. 55, n° 3.

Gordon, P., Kumar, G., Richardson, H., 1989, The influence of metropolitan structure on commuting time, Journal of Urban Economics, vol. 27, n° 3.

Gordon P., Kumar A., Richardson W., 1989, The Spatial Mismatch Hypothesis – Some New Evidence, Urban Studies 26.

Gordon, P., Richardson, H., Jun, M., 1991 The commuting paradox - evidence from the top twenty Journal of the American Planning Association.

Gordon P., Richardson W., 1995, Sustainable Congestion, in Brotchie F., Batty M., Blakely E., Hall P., Newton P., Cities in Competition, pp 348-58, Longman Australia, Melbourne.

Gordon, P., Richardson, H., W., 1996, Beyond polycentricity. The dispersed metropolis, Los Angeles 1970-1990, Journal of the American Planning Association, vol. 62, n° 3.

Gordon, P., Richardson, H.W., 1997, Are compact cities a desirable planning goal ?, Journal of the American Planning Association, vol. 63, n° 1.

Gordon, P., Richardson, H.W., 1997, Where's the sprawl ?, Journal of the American Planning Association, vol. 63 n° 3.

Gosh, A., 2005, Public-Private or a Private Public? Promised Partnership of the Bangalore Agenda Task Force, Economic and Political Weekly.

Gottman, J., 1961, Megapolis, Twentieth Century Fund, New York.

Gouarne, V., 1992, El Transporte en Bogota : Problemas y Soluciones. Dans Bogota: Problemas y Soluciones. DNP.)

Goueset, V., 1998, Bogotá nacimiento de una metrópoli : la originalidad del proceso de

concentración urbana en Colombia en el siglo XX. Santafé de Bogotá : Tercer mundo

Grobberio, S., Robazza, G., 2005, TransMilenio, trasporto collettivo e trasformazione urbana a Santa Fe de Bogota, Cordo di Laurea in Architterura, dir. Marcello, B. Istituto Universitario di Architettura di Venezia.

GTZ, 2002, Cleaner Fuels and Vehicle Technologies. Sustainable Transport : A Sourcebook for Policy-makers in developing cities, Module 4a. Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ).

GTZ, 2002, Natural Gas Vehicles. Sustainable Transport : A Sourcebook for Policy-makers in developing cities, Module 4d. Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ).

GTZ, 2004, Air Quality Management. Sustainable Transport : A Sourcebook for Policy-makers in developing cities, Module 5a. Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ).

GTZ, 2004, Two and Three Wheelers. Sustainable Transport : A Sourcebook for Policy-makers in developing cities, Module 4c. Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ).

GTZ, 2005, Mass Transit Options, Sustainable Transport: A Sourcebook for Policy-makers in Developing Cities, Module 3a.

Guigou, J-L., 1982, La rente foncière. Les théories et leur évolution depuis 1650, Economica.

Gutkind, E.A., 1964-72, International History of City Development. Vol I-VIII. London/

New York, The Free Press.

De Guzman, L.F., 1994, Plan vial de Bogotá, en Torres, P. (Editora) Soluciones al transporte en Bogotá. Bogotá, Sociedad Colombiana de Arquitectos Corporación LABORHABITAT.

Haeringer, Ph., Goudiard, R., 2000, Dialogue et questions sur la pauvreté majoritaire et la nouvelle économie urbaine, séminaire A.F.D. «Défis posés par le développement des villes du Sud».

Haeringer, P, Roussel, M-J., Theys, J.,2002 La refondation mégapolitaine, une nouvelle phase de l'histoire urbaine?, Direction de la Recherche et des Affaires Scientifiques et Techniques, CPVS, Techniques Territoires et Sociétés n°36.

Haeringer, Ph., 2002, La refondation mégapolitaine. Une nouvelle phase de l'histoire urbaine ?, Centre de prospective et de veille scientifique, Ministère de l'Equipement, Paris.

Haeringer, Ph., 2006, Villes et mondialisation. Relations probables et improbables, in La mondialisation, G. Wackermann (dir.), Ellipses, Paris.

Haeringer, Ph., 2006, Métropoles d'Orient et d'Extrême-Orient. Une décennie pour de nouvelles épures, in La mondialisation, G. Wackermann (dir.), Ellipses, Paris.

Haeringer, Ph., 2007, Après l'usine, la ville. L'indispensable économie endogène dans l'Uttar Pradesh et ailleurs, in La ville en Asie du Sud, CNRS/EHESS, collection Purushartha, Paris.

Hägerstrand, T., 1970, What about people in regional science?, Papers of the Regional Science Association 24.

Hall, P., 1997, The Future of the Metropolis and its Form, Regional Studies, Vol 31.3.

Handy, S., 1992, Regional versus local accessibility. Neotraditional development and its implications for nonwork travel, Built Environment, vol. 18, n° 4.

Handy, S., 1996, Methodologies for exploring the link between urban form and travel behavior, Transportation Research Part D, vol. 1 n° 2.

Handy, S., 2001, New Urbanism and Travel Behaviour, Comments prepared for the C.N.U IX, New York City.

Handy, S., 2002, Smart Growth and the transportation-land use connection : what does the research tell us ?, New Urbanism and Smart Growth: A Research Symposium, National Center for Smart Growth Research and Education, University of Maryland, College Park, MD.

Handy, S., 2005, Smart Growth and the transportation-land use connection: what does the research tell us ?, International Regional Science Review, vol. 28, n° 2.

Hansen, W., 1959, How accessibility shapes land-use, Journal of the American Institute of Planners, 25.

Hanson, S., Schwab, M., 1987, Accessibility and intraurban travel, Environment and Planning A, 19.

Harris C. D., Ullman E. L, 1945, The nature of cities, Annals of the American Academy of Political and Social Science, vol., 242, p. 7-17 (in Harold M. Mayer, Clyde F. Kohn, 1959; Readings in urban geography, Chicago, The University of Chicago Press).

Hartshorn, T., Ihlanfeldt, K., 2001, Growth and change in metropolitan Atlanta, in The Atlanta Paradox.

Harvey, D., 1973, Social Justice and the City, London, Edward Arnolds.

Haugton, G., Hunter, C., 1996, The sustainable cities, London, Jessica Kingsley Publishers.

Heitzman, J., 2004, Network city: Planning the information society in Bangalore, Oxford University Press, Oxford.

Hidalgo, D., Vargas, E., 1999, La historia del Metro, 50 Años de Planeación para el Metro de Bogotá in Revista Foro económico, regional y urbano. No. 13, Contraloría de Santa Fé de Bogotá, Luglio–Settembre.

Hidalgo, D., 2000, TransMilenio: El Sistema de Transporte Masivo de Bogotá.

Hidalgo, D., 2000, Preguntas y Respuestas sobre el metro de Bogotá, In Ricardo Montezuma (Ed.). Presente y futuro de la movilidad urbana en Bogotá: Retos y Realidades. Veeduría Distrial. Bogotá.

Hidalgo, D., 2000, El Metro: Urgente, Necesario, Conveniente y...está listo!, Power Point presentation. Metro Project.

Hidalgo, D., 2001, TransMilenio: El Sistema de Transporte Masivo de Bogotá, Paper presented at CLATPU, Havana, Cuba.

Hidalgo, D., 2001. TransMilenio: El Sistema de Transporte Masivo de Bogotá. Paper presented at CLATPU, Havana, Cuba.

Hidalgo D., 2001, TransMilenio: El Sistema de Transporte Masivo de Bogotá., Mimeo, Bogotá.

Hidalgo, D., 2002, TransMilenio: The Bus Rapid Transit System of Bogotá, Colombia. Paper presented at the Second International Conference on Urban Transportation Systems: Ensuring Sustainability through Mass Transit" April 14-18, 2002, Alexandria, VA, USA, presented by the American Society of Civil Engineers and the American Public Transportation Association.

Hidalgo, D., 2002, TransMilenio: The Bus Rapid Transit System of Bogotá, Colombia, Paper presented at the Second International Conference on Urban Transportation Systems: Ensuring Sustainability through Mass Transit, April 14-18, 2002, Alexandria,VA, USA, presented by the American Society of Civil Engineers and the American Public Transportation Association.

Hidalgo, D., 2002, TransMilenio: un sistema de transporte masivo de Alta Capacidad y Bajo Costo, Paper presented at the conference Dialogo Regional de Políticas de Transporte Urbano para el Cono Sur de América Latina, Santiago, Chile, December 9-11. Banco Interamericano de Desarrollo – CODATU.

Hidalgo, D., 2003, Bus Rapid Transit: Bogotá's TransMilenio, and Lessons for Asia, Better Air Quality 2003 Sub-workshop: Non-Motorized Transport and Public Transport, Manila, Philippines, December 17-19.

Hidalgo, D., 2003, Contribuciones de TransMilenio a los Sistemas de Transporte Masivo de Alta Capacidad en Buses BRT, Paper presented at the conference Seminario Internacional de Movilidad Alternativa y Humana, Bogotá, February 6-9. Fundación Ciudad Humana, Institute for Transport Development Policy, and Alcaldía Mayor de Bogotá.

Hidalgo, D., 2003, The backbone of the mobility strategy of Bogotá – TransMilenio, Public Transit International Magazine. UITP, September.

Hidalgo, D., 2003, TransMilenio: The Bus Rapid Transit System of Bogotá, Paper presented at the 55th UITP World Congress "The Challenges of Integration: Turning Multimodality into Seamless Mobility!" Madrid 4-9 May.

Hidalgo, D., 2004, Some points that make TransMilenio BRT so attractive, Conférence, ITDP.

Hidalgo, D., 2004, TransMilenio Bus Rapid Transit System Expansion 2002-2005 – Bogotá, Colombia, Paper presented at the Eleventh CODATU Conference, Bucharest.

Hidalgo, I., Illera, J., 2001, Evaluación socioeconómica de la primera fase del sistema TransMilenio, Universidad de Los Andes.

Hivert, L., Lecouvrey, F., Bourriot, F., Madre, J.-L., 2006, Bilan CO_2 des ménages. Les exemples de la région Ile-de-France et de l'arrondissement de Lille, Rapport CEREN et INRETS.

Hoyos, M.C., 1996, La Movilidad de las poblaciones y su impacto sobre la dinámica del área metropolitana de Bogotá, Documento de trabajo n°5, Metodología et resultados de la encuesta cualitativa. Bogotá, Orstom-CEDE.

Hoyt, H. 1939: The structure and growth of residential neighborhoods in American cities. Washington, DC: Federal Housing Administration.

Hoyt, H., 1954, Homer Hoyt on development of economic base concept, Land Economics, mai.

Hunt, J., Kriger, D., Miller, E., 2005, Current operational urban land use-transport modelling frameworks: a review, Transport reviews, Vol. 25, N°3,

Iacono, M., Levinson, D., El-Geneidy, A., 2007, Models of transportation and land use change: a guide to the territory, University of Minesota, Nexus Research Group.

IAURIF, Transports, contrainte énergétique, effet de serre: les termes du débat. Téléchargeable à partir de : www.iaurif.org/.../etudesenligne/ateliers-prospective/transports-contrainte-energetique-effet-serre.ppt

IAURIF, 2005, Note rapide sur l'occupation du sol, n°383.

IEA, 2002, Bus Systems for the Future, IEA/OECD, Paris.

IEA, 2002, Bus Systems for the Future; Achieving Sustainable Transport Worldwide, IEA Publications, France.

IEA, 2004, World Energy Outlook, IEA/OECD, Paris.

IEA, 2004, Biofuels for Transport, IEA/OECD, Paris.

IEA, 2005, CO_2 emissions from fuel combustion, 2005 IEA/OECD, Paris.

IEA, WBCSD, 2005, Sustainable Mobility, Project.

IFEN, 2000, Aménagement du territoire et environnement : politiques et indicateurs

IFP, 2007, Biocarburants : quels bilans sur l'environnement? Panorama IFP 2007, Institut Français de Pétrole.

IGES, 2004, Urban Energy Use and Greenhouse Gas Emissions in Asian Mega-Cities.

IGP-NAM-EGI-SICITER, 1997, Transportation Planning Handbook.

Indian Road Congress (IRC), 1995, Road Transport Energy, Special Publication n°28, New Delhi

Ingetec–Bechtel–Systra., 1997, Diseño Conceptual del Sistema Integrado de Transporte Masivo de la Sabana de Bogotá, FONDADE, DNP, Santa Fe de Bogotá.

Ingram, G., 1998, Patterns of Metropolitan Development: What Have We learned?, Urban studies, vol 35, n° 7

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2004, Tamaño de la población. Población según censos 1905-1993. Bogotá, http://www..ideam.gov.co

Jacobs, J., 1992, The Death and Life of Great American Cities. New York: Vintage Books.

Jacobs, M., 1992, Strategic planning and sustainable development English Nature, London

Jacobs, M., 1993, Sense and sustainability: land use planning and environmentally sustainable development Council for the Protection of Rural England, London.

Japanese Internacional Cooperation Agencie (JICA), 1996, Estudio del planmaestro del transporte urbano de Santafé de Bogotá en la república de Colombia. Informe final (Informe principal). Equipo de consultores de Chodai Co; Ltd y Yachiyo Engineering Co; Ltd.

Jaramillo, S., 1979, Evolution de l'espace urbain à Bogotá au XXe siècle. Université de Paris XII, these de doctorat en Urbanisme, Dir. Coing, H.

Jaramillo, S., 1990, La estructura urbana y la vivienda en Bogotá, in SANTANA P. (Editor) Vivir en Bogotá. Bogotá, Ediciones Foro Nacional por Colombia.

Jaramillo, S., 1992, Bajo el signo del UPAC : estructura de producción y política de vivienda en Colombia 1972-1990. En : Cambio estructural y crecimiento. Bogotá : Tercer mundo.

Jaramillo, S., 1992, La vivienda en Bogotá. Documento CEDE 87.

Jaramillo, S., 1994, Hacia una teoría de la renta del suelo urbano. Santafé de Bogotá : Ediciones Uniandes.

Jaramillo, S., Parias, A., 1995, Vida pasión y muerte del Tranvía en Bogotá. CEDE. UNIANDES. Bogotá.

Jaramillo, S., Paris, A., 1997, Vivienda de alquiler en Bogotá : agentes y acción estatal. En : La investigación urbana y regional en Colombia. Santafé de Bogotá : Carlos Valencia editores.

Jaramillo, S., Paris, A., 1998, Precios y submercados de vivienda en Bogotá 1980 - 1997. Documento CEDE.

Jaramillo, S., 2004, Los fundamentos económicos de la "participación en plusvalías". Colombia: Universidad de los Andes, Lincoln Institute of Land Policy, 50p.

Joly, I., 2003, L'hypothèse de Zahavi revisitée. Quelle pertinence ? », XXXIXème Colloque de l'asrdlf Concentration et ségrégation, Dynamiques et inscriptions territoriales, Lyon.

Jones D.,. May T., Wenban-Smith, A., 1990, Integrated transport studies : lessons from the Birmingham study, Traffic engineering + control, novembre 1990.

JRC, Concawe, EUCAR, 2007, Well-to-wheels analysis of future automotive fuels ans powertrains in the European context, Well-to-wheels report, Version 2c. DG Joint Research Centre.

JURONG, 2003, IT corridor, Bangalore, www.jurong.com

Kaufmann, V., 1993,Voiture ou transport public: un choix subjectif, en Transport public, N°354, abril, 1993.

Kaufmann, V., 1994, Comment organiser les déplacements urbains. Communication aux journées de formation à l'ENPC:Paris.

Kaufmann, V., Guidez, J.M., 1998, les citadins face à l'automobile, CERTU-ADEME-UTP.

Kenworthy, J., Laube, F., 1999, An International Sourcebook of Automobile Dependence in Cities, 1960-1990. Boulder: University Press of Colorado.

Kenworthy, J., Laube, F., 2001, The Millennium Cities Database for Sustainable Transport. Brussels: International Union of Public Transport (UITP) and Institute for Sustainability and Technology Policy (ISTP).

Kenworthy J., Townsend, C., 2002, An International Comparative Perspective on Motorisation in Urban China: Problems and Prospects. IATSS Research 26.

Kenworthy, J., Hu, G., 2002, Transport and Urban Form in Chinese Cities, DISP 151.

Kenworhy, J., Hu, G., 2002, Transport and urban Form in Chinese Cities: An International Comparative and Policy Perspective with Implications for Sustainable Urban Transport in China.

Kenworthy, J., 2003, Transport Energy Use and Greenhouse Gases in Urban Passenger Transport Systems : A Study of 84 Global Cities, Perth: Murdoch University

Kenworthy, J., 2003, Transport Energy Use and Greenhouse Gases in Urban Passenger Transport Systems: A Study of 84 Global Cities, presenté à International Third Conference of the Regional Government Network for Sustainable Development, Notre Dame University, Fremantle, Western Australia.

Kirwan, R., 1992, Urban form, energy and transport: A note on the Newman-Kenworthy thesis, Urban Policy and Research, vol. 10, n° 1.

Koenig, G., 1974, Théorie économique de l'accessibilité urbaine, Revue Economique, N°2.

Koenig, G., 1979, A propos de : Quelques réflexions sur la notion d'accessibilité, Les cahiers scientifiques de la revue transport. 4ème trimestre.

Koenig, J.G., 1980, Indicators of urban accessibility: Theory and application, Transportation 9.

Kröger, K., Fergusson, M., Skinner, I., 2003, Critical Issues in decarbonising transport : the role of technologies. Tyndall Centre for Climate Change Research. Working paper no. 36.

Krugman, P., 1991, Cities in space: three simple models, National Bureau of Economic

Research, Working Paper Series, no. 3607.

Kundu, A., 2003, Urbanisaion and Urban Governance: Search for a Perspective beyond

Neo-Liberalism, Economic and Political.

Lamblin, V., 2003, Empreinte Ecologique ou Empreinte Productive?, Futuribles analyse et prospective n°284

Lautso, K., Spiekermann, K., Wegener, M., Sheppard, I., Steadman, P., Martino, A., Domingo, R., Gayda, S., 2004, PROPOLIS Final Report, UE-DG Research, PROPOLIS

Lee, D., 1994, Retrospective on large-scale urban models, Journal of the American Planning Association, Vol. 60, N°1, Winter 1994.

Lefebvre, H., 1968, La vie quotidienne dans le monde moderne, Paris, Gallimard.

Lefèvre, B., 2006, La ville de Bangalore (Inde) face à ses ambitions mondialistes, EurOrient, n° 23

Lefèvre, B., 2006, Les transports urbains, défi environnemental de la croissance des villes indiennes, Ville en Développement, n°71, ISTED

Lefevre, B., 2007, Transports urbains: intégrer la complexité!, Urbanisme, n°355

Lefèvre, B., Vision a largo plazo e interactions "transporte – urbanismo", los excluidos en el exito del BRT TransMilenio de Bogota, Ciudad y Territorio, à paraître en 2008

Le Nir, M., 1991, Les modèles de prévision de déplacements urbains, thèse d'université, spécialité sciences économiques, option économie des transports, Université Lumière Lyon 2, Lyon.

Lent, T., 2004, Saving Money, Energy and Environment on BART, A comparative analysis of economic, environmental and energy impacts of commuting on the Bay Area Rapid Transit system instead of by automobile, Institute for Local Self reliance.

Leontief, W., 1941, The structure of the American Economy 1919-1939, 2nd ed. 1951, New York, Oxford University Press.

Litman, T. 1996. Defining and quantifying public transit benefits. Victoria : Victoria transport policy institute.

Litman, T., Laube, F., 2002, Automobile Dependency and Economic Development, Victoria Transport Policy Institute.

Litman, T., 2005, Win-Win Emission Reductions, Victoria Transport Policy Institute.

Litman, T., 2007, TDM encyclopedia, Victoria Transport Policy Institute.

Lleras, G. C., 2003, Bus Rapid Transit: Impacts on Travel Behavior in Bogotá, Master's Thesis. Department of Urban Studies and Planning. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.

Lonja de Propiedad Raíz de Bogotá, 2004, El valor del suelo en Bogotá - 2004., Bogota.

Lorrain, D., 2001, Gigacity: The Rise of Technological Networks in Daily Life, Journal Of Urban, Technology, volume 8, number 3,

Lowry, I., 1964, A model of a metropolis, RM-4035-RC, Rand Corporation, Santa Monica.

Mackett, R., 1990, Comparative analysis of modelling land-use transport interaction at the micro and macro levels, Environment and Planning A, 1990, volume 22.

Mackett, R., 1990, The systematic application of the LILT model to Dortmund, Leeds and Tokyo », Transport Reviews, Volume 10, N°4.

Mackett, R., 1991, A model-based analysed of transport and land-use policies for Tokyo », Transport Reviews, Volume 11, N°1.

Mackett, R., 1991, LILT and MEPLAN **:** a comparative analysis of land-use and transport policies for Leeds, Transport Reviews, Volume 11, N°2.

Mackett, R., 1992, Policy analysis using a microsimulation model of land use and transport systems, Selected Proceedings of the Sixth World Conference on Transport Research, Volume I, Lyon.

Mackett, R., 1993, Structure of linkages between transport and land use, Transportation Research - B, Vol. 27B, N°3.**Malpezzi, S., Wen-Kai, G.,** 2001, Measuring 'Sprawl': Alternative Measures of Urban Form in US Metropolitan Area, The Center of Urban Land Economics Research.

Malpezzi, S., Mayo, S.,1997, Getting Housing Incentives Right: A Case Study of the Effects of Regulation, Taxes and Subsidies on Housing Supply in Malaysia, Land Economics.

Marshall Kaplan, Gans, Kahn, 1970, The model cities program: the planning process in Atlanta, Seattle and Dayton, US economic and social development.

Martens, M.J., Griethuysen, S.v., 2000, The ABC location policy in the Netherlands - The right business at the right place, TNO Inro.

Martinez de Vargas, B, Duenas Pinto, N., 2003, La Movilidad y el Transporte en la construcción de imagen de Ciudad: El sector de San Diego en Bogotá, D.C., Seminario de Arquitectura Latinoamericana, X SAL, Montevideo.

Martínez, C., 1983, Bogotá, sinopsis sobre su evolución urbana – 1536 a 1900-.Bogotá: Escala.

Martinez, L., Medina, Z., Santana, C., 2003, Effectos del sistema de Transporte masivo – TransMilenio Primera Fase sobre la Calidad de Vida Urbana, Universidad Santo Tomas, Facultad de Economia, Bogota.

Martinez, F., 1992, The bid-choice land-use model : an integrated economic framework, Environment and Planning A, 1992, volume 24.

Martinez, F., 1992, Toward the 5-stage land-use transport model, Selected Proceedings of the Sixth World Conference on Transport Research, Volume I, Lyon.

Martinez, F., 1995, Access : the transport-land use economic link, Transportation Research, Vol. 29 B, N°6.

Martinez, F., 1996, Analysis of urban environnemental policies assisted by behavioural modelling, in Hayashi, Y., Roy J., Transport, land-use and the environnement, Kluwer academic publishers, The Netherlands.

Massey, D., 1984. Spatial Divisions of Labour. London: Macmillan

Masson, S., 1995, Prototype de modèle stratégique de simulation des déplacements : application au cas de l'agglomération lyonnaise. PREDIT, rapport pour le compte de la DRAST, du Grand Lyon, DRE Rhône-Alpes, DDE 69.

Masson, S., 1998, Interactions entre système de transport et système de localisation : de l'héritage des modèles traditionnels à l'apport des modèles interactifs de transport et d'occupation des sols, Les Cahiers Scientifiques du Transport, n°33.

Masson, S., 2000, Les interactions entre le système de transport et système de localisation en milieu urbain et leur modelisation, Thèse pour le doctorat de sciences économiques, Mention économie des transports, Dir. Bonnafous, A., Université Lumière Lyon 2, Faculté de Sciences Economiques et de Gestion.

Massot, M.H., 1995, La mobilité, une alternative à la densification du centre. Les relations domicile travail, Annales de la recherche urbaine, n°67.

Massot, M.H., Orfeuil, J.P., 1995, La mobilité, une alternative à la densification du centre. Les

relations domicile-travail, Les Annales de la Recherche Urbaine, n° 67.

Massot, M.H., Orfeuil, J.P., Bellanger, F., 2000, Eléments pour une prospective de la mobilité, Contrat pour la Drast-MELT, Inrets.

McDonald, J.F., Osuji, C.I., 1995, , The Effect of an Anticiped Transportation Improvement on Residential Land Values, Regional Science and Urban Economics, Vol. 25.

McFadden, D., 1973, Conditional Logit Analysis of Qualitative Choice Behavior, in Zarembka, P. (ed.), Frontiers in Econometrics, Academic Press.

MCKINSEY & Co.,1999, Consultoría Gerencial para la Implementación de la Reestructuración del Transporte Público en Santa Fe de Bogotá, D. C., contratado para el proyecto COL/98/015. Consultoría Gerencial." Bogotá.

McLaren, D., 1992, Compact or Dispersed ? – dilution is no solution, Built Environment 18.

McLaughlin, W., 1966, Multi-path System Traffic Assignement Algorithm, Research Reports RB 108, Ontario, Department of Highways.

MEDD, 2004, Indicateurs nationaux du développement durable : lesquels retenir ?, Réponses Environnement, La Documentation Française.

Mesa de Planificación Regional Bogota – Cundinamarca, 2005, De las Ciudades a las Regiones, Desarrollo Regional Integrado en Bogota-Cundinamarca, Mesa de Planificación Regional Bogota – Cundinamarca, UNCRD, UNDESA.

MIES, 2003, Quantification territoriale des émissions de gaz à effet de serre, Rapport final.

MIES, 2003, Quantification des émissions de gaz à effet de serre à l'échelle territoriale.

MIES, 2003, outil de planification énergétique, CCP, http://www.energie-cites.org/quantification/documents1/ccp.pdf

MIES, 2003, outil de planification énergétique, GEMIS, http://www.energie-cites.org/quantification/documents1/gemis_3.pdf

MIES, 2003, outil de planification énergétique, ETAP http://www.energie-cites.org/quantification/documents2/etap.pdf

MIES, 2003, outil de planification énergétique, ETAP http://www.energie-cites.org/quantification/documents3/nordrhein_westphalen.pdf

MIES, 2003, outil de planification énergétique, ETAP http://www.energie-cites.org/quantification/documents3/atenee.pdf

Miller, E., Kriger, D., Hunt, J., 1998, Integrated urban models for simulation of transit and land-use policies, TCRP Project H-12 Final Report, University of Toronto, Joint program in Transportation and DELCAN Corporation

Mills E., 1967, An aggregative model of ressource allocation in metroplitan areas, American Economic Reviews, Papers and Proceedings, Vol. 57, pp. 197-210.

Ministère de la Coopération Français, 1995, Décentralisation.

Ministerio de Transporte, 2001, TransMilenio, El sistema Masivo de Bogota, Bogota, Ej.1.

Misión Bogota Siglo XXI, 1992, La localización de la actividad económica. Bogotá.

Misión Bogota Siglo XXI, 1992, Pobreza y distribución del ingreso. Bogotá.

Misión Bogota Siglo XXI, 1992, Relaciones de Bogotá D.C. con la Sabana. Bogotá.

Mohan, R., Chandrashekhar, P., 1982, Morphology of Urbanisation in India: Some

Results from 1981 Census." Part 1 and 2, Economic and Political Weekly.

Mohan, R., 1994, Understanding the Developing Metropolis. World Bank, New York:

Oxford University Press.

Mohan, R., 1997, Committee Report on Infrastructure: The India Infrastructure Report:

Policy Imperatives for Growth and Welfare, (vol 1 and 2).

Molin, J., Vulin, B., 1992, La distance n'est plus ce qu'elle était, Selected Proceedings of the Sixth World Conference on Transport Research, Volume I, Lyon.

Molina, H., 1992, Estructura y Tendencias de crecimiento, Misión Bogotá Siglo XXI, Bogotá.

Montezuma, R., 1992, Réalités et perspectives des transports en commun a Bogotá: Y a-t-il une nouvelle voie pour les transports en commun ? Mémoire en dispense de DEA.. ENPC, IFU. Director: Merlin, P., 67 p.

Montezuma, R., 1995, El futuro del transporte urbano para Bogotá, está definido?, en Nueva Ruta, N°40.

Montezuma, R., 1996, El transporte urbano: un desafío para el próximo milenio. Seminario sistemas de transporte para las grandes ciudades, CEJA/INJAVIU, Bogotá.

Montezuma, R., 1998, Les transports urbains: organization, gestion et le processus d'urbanisation a Bogotá. Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de docteur de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Spécialité: Urbanisme et Aménagement. Champs-sur-Marne, 13 de mayo de 1998. Director: Merlin, P. 537 p.

Montezuma, R., 1999, Bogota: ciudad y movilidad. El papel del transporte en el proceso de urbanización, 1884-1998. Bogotá, CEJA-INJAVIU

Montezuma, R., 1999, Bogota: ciudad y movilidad. El papel del transporte en el proceso de urbanización, 1884-1998. Bogotá, CEJA-INJAVIU

Montezuma, R., 2000, Presente y futuro de la movilidad urbana en Bogotá. Retos y realidades. Veeduría Distrital. Bogotá.

Montezuma, R., 2000, Presente y futuro de la movilidad urbana en Bogotá. Retos y realidades. Veeduría Distrital, INJAVIU, El tiempo, Bogotá.

Montezuma, R., 2000, Movilidad en Bogotá en el siglo XX, In Ricardo Montezuma (Ed.). "Presente y futuro de la movilidad urbana en Bogotá: Retos y Realidades. Veeduría Distrial. Bogotá.

Montezuma, R., 2000, Metros y transformación urbana en América Latina: Bogotá necesita más de un metro, Power Point presentation.

Montezuma, R., 2000, Presente y Futuro de la movilidad urbana en Bogotá: retos y realidades, Veeduría Distrital, Bogotá.

Montezuma, R., 2003, La Transformación de Bogotá 1995-2000. Entre redefinición ciudadana y espacial, Ciudad Humana. Bogotá.

Montezuma, R., 2004, La Transformation de Bogota 1995–2000, Ciudad y Mobilidad Collection, Bogota

Moriconi-Ebrard, F., 2000, De Babylone à Tokyo, Géophrys, Paris.

Muller, P.O., 1995, Transportation and Urban Form: Stages in the Spatial Evolution of the American Metropolis, In Hanson, S. (ed.) The Geography of Urban Transportation.

Mumford, L., 1938, The Culture of Cities, London, Secker and Warburg.

Mumford, L., 1961, The City in History: Its Origins, its Transformations and its Prospects, London, Secker and Warburg.

Muth, R., 1969, Cities and housing, University of Chicago Press.

Naess, P., 1999, Transportation and Urban Planning, Aalborg University.

National Physical Planning Agency, 1991, Summary of the fourth report extra on physical planning Ministry of Housing, Physical Planning and Environment, The Hague.

Négrier, E., Tomàs, M., 2003, Temps, pouvoir, espace : la métropolisation de Barcelone, in Revue Française d'Administration Publique, n°107.

Newling, B., 1969, The spatial variation of urban population densities, Geographical Review, n°59.

Newman P., Kenworthy J.R., 1991, Transport and urban form in thirty two of the word's principal cities, Transport Review, n°3.

Newman P., Kenworthy J.R., 1984, The use and abuse of driving cycle research: Clarifying the relationship between traffic congestion, energy and emissions. Transportation Quarterly 38.

Newman, P., Hogan, T., 1987, Urban Density and transport : A simple model based on 3 city types, Environmental Science, Murdoch University, Transport Research Paper n° 1.

Newman P., Kenworthy J.R., 1988, The transport energy trade-off: Fuel-efficient traffic versus fuel-efficient cities. Transportation Research 22A.

Newman P., Kenworthy J.R., 1989, Cities and automobile dependence: An international sourcebook. Aldershot: Gower.

Newman, P., Kenworthy, J., 1989, Gasoline consumption and cities - a comparison of UK cities with a global survey Journal of the American Planning Association.

Newman, P., 1992, The compact city - an Australian perspective Built Environment.

Newman, P., Kenworthy, J., 1992, Is there a role for physical planners? journal of the American Planning Association.

Newman, P., 1995, Sustainability and the post-modern city: some guidelines for urban planning and transport practice in an age of uncertainty, The Environmentalist, Vol. 15, n°4.

Newman, P., Kenworthy, J., Vintila, P., 1995, Can we overcome automobile dependence ?, Cities, vol.12, n° 1.

Newman, P., 1996, Reducing Automobile Dependence, Environment and Urbanization, vol. 8, n° 1.

Newman P., Kenworthy J.R., 1999, 'Relative speed' not 'time savings': A new indicator for sustainable transport. In: Papers of the 23rd Australasian Transport Research Forum, Volume 23, Perth.

Newman P., Kenworthy J.R., 1999, Sustainability and Cities: Overcoming Automobile Dependence. Washington DC: Island Press.

Newman, P., Kenworthy, J., 1999, Costs of automobile dependence : Global survey of cities, Transportation Research Record, n° 1670.

OCDE, 2002, Indicators to measure decoupling of environmental pressure from economic growth, General Secretariat

OCDE, 2002, Aggregated Environmental Indices – review of aggregation methodologies in use, Working Group on Environmental Information and Outlooks.

Offner, J.M., 1992, Les déplacements urbains. París, La documentation française, Colección Problèmes politiques et sociaux, N°690.

Offner, J.M., 1993, Les « effets structurants » du transport: mythe politique, mystification scientifique, en L'espace géographique, N°3.

Olfield R.H., 1993, A strategic transport model for the London area. Research Report 376, Transport Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire.

Ons, P., 2003, Le diagnostic énergétique du bâtiment, Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie (IEPF), fiche technique n°2

Orfeuil, JP., 1996, Urbain et périurbain: qui va où?, en Urbanisme, Julio/ agosto 1996, N°289, pp52-57.

Ospina, A., 2006, Historia del transporte público en Bogota.

Owens, S., 1991, Energy conscious planning Council for the Protection of Rural England, London

Owens, S., 1992 Energy, environmental sustainability and land-use planning in Breheny M ed. Sustainable development and urban form Pion, London.

Owens, S., 1995, The Compact City and Transport Energy Consumption**,** A response to Michael Breheny, Transactions of the Institute of British Geographers, New Series, Vol. 20, No. 3.

De Palma A., Lefevre C., 1985, Residential change and economic choice behavior, Regional Science and Urban Economics, 15, 1985.

De Palma A., Marchal F., 1996, Métropolis : un outil de simulation du trafic urbain, Transports, n°378, juillet-août.

De Palma A., Thisse J.F., 1989, Les modèles de choix discrets, Annales d'Economie et de Statistique, N°14, Avril-Juin.

Papageourgiou, Y.Y., 1973, The impact of the environment upon the distribution of population and land values, Economic Geography, 49.

Park, R.E., Burgess, F.W., MacKenzie, R.D., 1925, The City. Chicago: Chicago University Press.

Park, R.E., 1936, Human ecology, The American Journal of Ecology 42.

Paul, S., 1998, Making Voice Work: The Report Card on Bangalore's Public Services, Public Affairs Centre, Bangalore.

Pelletier J., Delfante C., 1997, Villes et urbanisme dans le monde, collection U, Armand Collin.

Peñalosa, E., 1997, Por la Bogotá que queremos." Programas de Gobierno de los Candidatos a la Alcaldía Mayor de Santa Fe de Bogotá. Cuadernos de la Capital, Unidad de Atención al Distrito Capital, Departamento Administrativo de la Acción Comunal. Bogotá.

Peñalosa E., 2002 “Urban Transport and Urban Development: A Different Model”. Speech conducted in the Center for Latin American Studies, University of California, Berkeley.

Peñalosa, E., 2003, Rapid Implementation Strategies for Sustainable Transport: The Bogotá Story, Paper presented at the 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington DC.

Peñalosa, E., 2003, TransMilenio es hoy una empresa ejemplo de administración pública, In Jairo Gómez TransMilenio: la joya de Bogotá. TransMilenio S.A.

Pernelle, J., Lacoste, G., 2005, Modes de vie en villes nouvelles – le point de vue des habitants. Programme interministériel d’histoire et d’évaluation des villes nouvelles françaises. Actes de la restitution d’étude et débat du jeudi 13 octobre 2005.

PNUH, 2004, State of the World’s Cities Report 2004/5

Poulit, G., 1974, Urbanisme et transport : les critères d’accessibilité et de développement urbain. SETRA, Ministère de l’Equipement, Paris.

Poulit, G., 1994, Evaluation de l’efficacité économique et environnementale des infrastructures de transport desservant les espaces de vie économique et récréative, in Cercle de réflexion Infrastructure et Aménagement, septembre 1994.

Pouyanne, G., 2004, Forme urbaine et mobilité quotidienne, Thèse d’Etat es-Sciences Economiques réalisée sous la direction de Claude Lacour, Université Montesquieu-Bordeaux IV.

Pridmore, B., 2002, The role of hydrogen in powering road transport. Tyndall Centre for Climate Research, Working Paper.

Proyekta LTDA, 1996, Evaluación integral de estacionamientos de la carrera 15, IDU-Fernando Cortés, Bogotá.

Putman, S., 1983, Integrated Urban Models. London, Pion.

Putman, S., 1991, Integrated Urban Models 2: New Research and Applications of Optimization and Dynamics. London, Pion.

Puyo, F., Zambrano, F., Vargas, J., 1988, Historia de Bogotá, edición conmemorativa de los 450 años de su fundación, Puyo, F. (ed), Bogotá, Fundación Misión Colombia-Salvat Villegas, Primer tomo.

Quirin, M., Gärtner, S.O., Pehnt, M., Reinhardt, G.A., 2004, CO_2-neutrale Wege zukünftiger Mobilität durch Biokraftstoffe: Eine Bestandsaufnahme (CO_2 Mitigation through Biofuels in the Transport Sector. Status and Perspectives). Final report. By order of FVV, Frankfurt.

Raad T. and Kenworthy J. R., 1998, The US and Us. Alternatives 24.

Rabinovitch, J., Hoehn, J., 1993, Creating a linear city with a surface metro, IPPUC.

Ragon, M., 1991, Histoire de l’architecture et de l’urbanisme modernes, tome 1, 2 et 3, Seuil, Points Essais, n°231, 232 et 233.

Rao, A., 2005, Bangalore: whither the future, in India Together.

Raux C., 1983, Modèles et prévision des comportements de mobilité quotidienne. Thèse pour le doctorat de Docteur - Ingénieur en Economie des Transports. Université Lumière Lyon 2, Laboratoire d’Economie des Transports, Lyon.

Raux, C., 1993, Centralité, polynucléarité et étalement urbain : application au cas de l’agglomération lyonnaise, in Transport et Etalement urbain : les enjeux dirigés par Bussiere et Bonnafous

Raux C., Lhomet E., Masson S., 1996, Un modèle stratégique de simulation des déplacements urbains. Conception et aspects méthodologiques, Recherche, Transports, Sécurité, N°52, Juillet-Septembre.

Rebelo, J., 2003, Basic Busway Data. www.worldbank.org/transport.

Rees, W., Wackernagel, M., 1994. Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth. Gabriola Island, B.C.: New Society Publishers.

Renard, V., 1994, Question foncière et développement urbain à Santiago et Bogota, Problèmes d'Amérique latine, n°14, La ville et l'Amérique latine, La documentation Française

Renard, V., 2001, La planification urbaine et les marchés immobiliers, Variance, N° 18.

Renard, V., 2001, Contribuable, propriétaire ou promoteur : qui doit payer les infrastructures ?, dans Fabriquer la ville. Outils et méthodes : les aménageurs proposent.", Documentation Française.

Renard, V., 2002, Les dynamiques économiques des villes du 21ème siècle : dérives des marchés immobiliers et fragmentation urbaine. Communication à l'Académie des Sciences Morales et Politiques.

Renard, V., 2003, Les politiques foncières de la mixité, Annales de la recherche urbaine, N° 93, Mars.

Renard, V., 2003, L'improbable convergence des systèmes fonciers : de la difficulté de transférer des outils de politiques foncières d'un pays à l'autre, Etudes Foncières, n°100

Richardson H.W., 1977, On the possibility of positive rent gradients, Journal of Urban Economics, Vol. 4.

Rickaby, P., 1987 Six settlement patterns compared Enviromnent and Planning B, Planning and Design.

Rickaby, P., Steadman, P., Barrett, M., 1992 Patterns of land use in English towns: implications for energy use and carbon dioxide emissions in Breheny, M., ed. Sustainable development and urban form Pion, London.

Rieb, G., Bernard, A., Bernard-Hervé, M., 2006, La construction en Chine, in Regards sur la terre, P. Jacquet et L. Tubiana (dir.), Presses de Sciences Po.

Riveros, J., 2004, Reformas en la legislación del suelo en los años noventa. Bogotá.

Robles Hoyos, M.I., 2006, El sistema de transporte masivo "TransMilenio", Efectos en el precio del suelo, Tesis de Urbanismo, Universidad Nacional de Colombia, Dir. Montenegro, F.

Robson, B., 1994, No city, no civilization, Transactions of the Institute of British Geographers 19.

Roda, P., 1994, Posibles efectos de la apertura económica en el crecimiento de las ciudades, in Políticas e instituciones para el desarrollo urbano futuro en Colombia. Bogotá, Ministerios de Desarrollo Económico Departamento Nacional de Planeación Programa.

Rodríguez, D., 1998, Reflexiones sobre las concesiones de transporte urbano en Latinoamerica." Debates de Coyuntura Económica. No. 47. Fedesarrollo. Bogotá.

Rodríguez, D., 1999, Expanding to Urban Transportation Infrastructure Through Concession Agreements: Lessons from Latin America, Transportation Research Record, 1659.

Rodríguez, D., 1999, Proyecto Transmilenio, Mejor Lento Pero Seguro." El Tiempo, July 12.

Rodríguez, D. 2000, Proximate commuting: Hype or potential? Evaluating its Commuting Savings, in Transportation Research Record.

Rodríguez, D., Ardila, A., 2002 An Empirical Exploration of Bus Travel Times and Dwell Times in a Highly Competitive Exclusive Busway, Journal of Public Transportation, Vol. 5, No. 1.

Rodríguez, D. Ardila, A., 2002, To Dwell or not to Dwell: Running Time and Dwell Time Models for Bogotá's Exclusive Busway", Journal of Public Transportation. Vol. 5, No. 1.

Rodríguez, D., Targa, F., 2003, The value of accessibility to Bogotá's bus rapid transit system, Transport Reviews.

Rodriguez, J.P., 2005, Urban Transportation , in The Geography of Transport Systems, co-editor with Slack, B., Comtois, C., Routledge,

Rodríguez Vitta, J., 2006, La transformación de Bogota, Marco estructural y políticas urbanas, Grandes Proyectos Urbanos en America Latina, Primera Fase, Lincoln Institute of Land Policy.

Roehner, B., 1999, Spatial analysis of real state price bubbles : Paris, 1984 - 1993. En : Regional

science and urban economics Volumen 29 Número 1. Elsevier - North Holland.

Rojas, F., Moncayo, V., M., 1994, Actores públicos y privados en desarrollo urbano, in Políticas e instituciones para el desarrollo urbano futuro en Colombia. Bogotá, Ministerios de Desarrollo Económico Departamento Nacional de Planeación Programa.

Roodman, D., 1998, The Natural Wealth of Nations – Harnessing the market for the environment, WW. Norton&Co

Roth, G.J., Zahavi, Y., 1981, Travel time "budgets" in developing countries, Transportation Research, A n°15.

Roussel M.J., Theys J. et al., 1999, Maîtriser l'étalement urbain: une première évaluation des politiques menées dans quatre pays (Angleterre, Norvège, Pays-Bas, Hong-Kong), Ministère de l'équipement, des transports et du logement, Centre de Prospective et de Veille Scientifique - Direction de la recherche et des affaires scientifiques et techniques, 2001 Plus n°49.

Ruet, J., 2002, Infrastructure urbaine dans les pays émergents : l'ère des sous système ?, CERNA, Ministère de l'Equipement, Paris.

Salazar, F., 1988, Les transports en commun outil d'une politique d'urbanisme à Bogotá. Paris VIII. Institut Français d'Urbanisme, DEA rapport préliminaire 1988, Director: Merlin, P.

Salcedo, G., 1987, Aspectos básicos del transporte en Colombia. Bogotá, Angular.

Sandoval, E., Hidalgo, D., 2002, TransMilenio: A high capacity - low cost bus rapid transit system developed for Bogotá, Colombia, Unpublished mimeo, TransMilenio S.A., Bogotá, Colombia.

Sassen, S., 1991. The Global City: New York, London, Tokyo. Princeton, NJ: Princeton University Press.

SCE-CREOCEAN, 2004 et 2005, Metropolitan Spatial Data Infrastructure for Bangalore.

SCE-CREOCEAN, 2005, Traffic and Transportation Policy and Strategy, Concept Paper

Schäfer, A., 1995, Trends in Global Motorized Mobility The Past 30 Years and Implications for the Next Century, IIASA, WP-95-49, Luxenburg.

Schäfer, A., 1998, The Global Demand for Motorized Mobility, Transportation Research – A. vol. 32., n°6.

Schäfer, A., 2000, « Regularities in travel demand : An international perspective », Journal of Transportation and Statistics, Vol. 3, n°3, pp. 1-31.

Schäfer, A., Victor, D., 2000, The future mobility of world population, Transportation Research Part A, vol. 34.

Schaefer, B., 1994, Comment organiser les déplacements urbains. Communication aux journées de formation à l'ENPC:Paris.

Schaeffer, K.H., Sclar, E., 1975, Access for all: transportation and urban growth, Harmondsworth, Baltimore : Penguin Books.

Schipper, L., Marie-Lilliu, C., Gorham, R., 2000, Flexing the link between Transport and Greenhouse Gas Emissions : A path for the World Bank, Paris : International Energy Agency.

Schipper, L., Marie-Lilliu, C., Lewis-Davis, G., 2000, Rapid motorization in the largest countries in

Asia : implication for oil, carbon dioxide, and transportation, Pacific & Asian Journal of Energy, vol. 10, n° 2.

Schipper, L., 2002, Sustainable Urban Transport in the 21st Century , Refereed paper presented at the January, 2002 Meeting of the US National Resource Council's Transportation Research Board in Washington DC

Silva, J., Sandilands, R., 2001, Housing Finance in Colombia : From UPAC To UVR

Simmonds, D., Jenkinson, N., 1993, Regional Economic Impacts of the Channel Tunnel, Proceedings of the PTRC Summer Annual Meeting 1993. PTRC, London.

Simmonds, D., 1996, Available methods for Land-Use/Transport interaction modelling, David Simmnds Consultancy.

Simmonds, D., Echenique, M., Bates, J., 1999, Review of Land-Use/Transport interaction models, DETR.

Smith, A., 1998, La economía de santa fe de Bogotá: un enfoque global. Bogotá D.C.

Smith, N., Williams, P.,1986, Gentrification of the City. London: Winchester.

Spector, T., Theys, J., Menard, J-F., 1998, Villes du XXIe siècle : entre villes et métropoles, rupture ou continuité?, Tome I et II, issus du colloque de La Rochelle organisé par le CPVS, CERTU

Solomon, B., 2000, Governance, economic setting and poverty in Bangalore, Environment & Urbanization Vol 12, n° 1.

Solomon, B., Shuvaneswari, R., 2001, Democracy, Inclusive Governance, and Poverty in Bangalore, working paper n° 26, Urban Governance, Partnerships and Poverty: ESCOR-funded Research in 10 Cities: 1998-2001. International Development Department, School of Public Policy, University of Birmingham, U.K..

Solomon, B., 2004, Emerging globalized city forms in the South - some implications for planning, workshop Energy and transport in Peri-urban Indian communities, Bangalore.

Steer Davis Gleave, 2000, Diseño técnico operacional del sistema TransMilenio. Proyecto de Transporte Urbano para Santa Fe de Bogotá. Secretaría de Tránsito y Transporte, Bogotá.

Stares, Z., 1996, Motorization in Chinese Cities : Issues and Actions. China's Urban Transport Development Strategy. World Bank Discussion Paper n° 352

Steer Davis Gleave, 2000. Diseño técnico operacional del sistema TransMilenio. Proyecto de Transporte Urbano para Santa Fe de Bogotá. Secretaría de Tránsito y Transporte, Bogotá.

Steiner, R.L., 1994, Residential density and travel patterns: Review of the literature, Transportation Research Record 1466, Washington, DC: TRB, National Research Council.

Susskind, L., Cruikshank, J., 1987, Breaking the Impasse: Consensual Approaches to Resolving Public Disputes, Houghton-mifflin, Boston.

Susskind, L., Field, P., 1996, Dealing with an Angry Public: the Mutual Gains Approach. Free Press.

Tabourin, E., 1989, Un modèle de simulation du finacement des transports collectifs urbains à l'horizon 2000 : le modèle QUINQUIN, application à l'agglomération lyonnaise. Thèse d'Université pour le Doctorat de Sciences Economiques, Université Lumière Lyon 2, Lyon.

Talen, E., 2005, New Urbanism & American Planning: The Conflict of Cultures. New York: Routledge.

Targa, F., 2003, Examining Accessibility and Proximity-Related Effects of Bogotá's Bus Rapid System Using Spatial Hedonic Price Models, University of North Carolina, Tesi del master in pianificazione regionale, Chapel Hill.

Targa, F., Rofriguez, D., 2004, Analysisof Bogota's Bus Rapid Transit and its Impact on Land Development, Carolina Planning Journal, Vol 29, N°1.

Thomson, I. UN Economic Commission for Latin America and the Caribbean, (UNECLAC), 2001, The Impacts of Social, Economic and Environmental Factors on Public Transport in Latin American Cities, International Seminar on Urban Transport, Bogota, Colombia.

Torres, P., 1994, La movilidad en la Ciudad de Hoy, en Torres, P. (Editora) Soluciones al transporte en Bogotá. Bogotá, Sociedad Colombiana de Arquitectos Corporación LABORHABITAT.

Torres E., 2002, Adapter localement la problématique du développement durable : rationalité procédurale et démarche-qualité, Revue Développement Durable et Territoires

TransMilenio 2003, Plan Marco Sistema TransMilenio, Dirección de planeación de transporte, TRANSMILENIO S.A. Bogota, Colombia.

TransMilenio, 2004, ¿Quienes somos? Bogotá D.C., http://www.transmilenio.com.co

Treiffesen, P. A., 1992, Land markets, housing, and changing the spatial structure : the case of

Bogotá, Colombia. Tesis doctoral. California University at Berkeley.

Tribillon, J.F., 2002, L'urbanisme, Repères, La Découverte

Truman, A., Hartshorn, K., Ihlanfeldt,**R.**, 2001 Growth and change in metropolitan Atlanta, in The Atlanta Paradox.

United Nations, Population Division, 2000, World urbanization prospects : the 1999 revision.

United Nations, **Population Division,** 2004, World Urbanization Prospects, The 2003 Revision

United Nations, UN-HABITAT, 2005, The State of the world'scities, 2004/2005 Globalization and Urban Culture.

United States General Accounting Office (GAO), 2001, Bus Rapid Transit Shows Promise, Report to Congressional Requesters.

Vandermotten, C., Roelandts, M., Cornut, P., 2005, Le polycentrisme européen : du projet aux faits, Colloque de La Rochelle.

Vuchic, V., 1992, The Role and Organization of Transfers in Transit Networks, Proceedings of the 6th World Conference on Transport Research - WCTR, Lyon.

Vuchic, V., 1999. Transportation for livable cities. New Brunswick (New Jersey) : Center for Urban Policy Research Press.

Wachs, M., 1989/90, Regulating traffic by controlling land use: the southern California experience Transportation 16.

Waddell, P., 1998, An Urban Simulation Model for Integrated Policy Analysis and Planning : residential location and housing market components of UrbanSim, Paper presented at the 8th World Conference on Transport Research, Antwerp, Belgium, July 12-17 1998.

Waddell, P., 2001, UrbanSim: Modeling Urban Development for Land Use, Transportation and Environmental Planning. Working paper Paul Waddell, Université de Washington, Seattle.

Ward, H., 1986, Economía regional y urbana. Madrid : Alianza editorial.

Watt K.E.F. and Ayres C., 1974, Urban land use patterns and transportation energy cost. In: Proceedings of The Annual Meeting of the American Association for the Advancement of Science, San Francisco.

Webster, F., Paulley, N., 1990, An international study on land-use and transport interaction, Transport Reviews, Volume 10, N°4, Oct-Dec.

Wegener M., 1991, One city, three models : comparison of land-use / transport policy simulation for Dortmund, Transport Reviews, Volume 11, N°2, 1991, pp. 107-129.

Wegener M., 1994, Operational Urban Models : state of the art, in Journal of the American Planning Association, Vol. 60, N°1, Winter, pp. 17-29.

Wegener, M., Fürst, F., 1999, Land Use Transport Interaction : State of the Art, Deliverable 2a of the project TRANSLAND of the 4th RTD Framework Programme of European Commission.

Wegener, M., 2000, A New ISGLUTI : the SPARTACUS and PROPOLIS Projects, Second Oregon Symposium on Integrated Land Use and Transport Models.

Wiel, M., 1999, La transition urbaine ou le passage de la ville pédestre à la ville motorisée.

Wiel, M., 2002, Villes et automobile, Descartes et Cie, coll. Les urbanites.

Williams, H., 1977, On the formation of travel demand models and economic evaluation measures of users benefits, Environment Planning A, 9.

Wilson, A.G., 1967, A statistical theory of spatial distribution models. Transportation Research 1.

Wilson, A.G., 1970, Entropy in Urban and Regional Modelling. London: Pion.

Wingo L., 1961, Transportation and urban land, Ressource for the future ?, Inc. Washington D.C.

World Commission of Environment and Development (WCED), 1987, Our Common Future, Oxford University Press.

World Bank, 2001, Cities on the Move: an Urban Transport Strategy Review.

World Bank. "India's Transport Sector: The Challenges Ahead." Vol. 1 Main Report,

May 10, 2002.

World Bank, 2002. Cities on the Move: a World Bank Urban Transport Strategy Review. The World Bank.

World Health Organization (WHO), 1997, Health and the environment in sustainable development – five years after the earth summit, Geneva

Wright, L, 2004, The limits of technology: Achieving transport efficiency in developing nations. University College London, Mai 2004.

Wright, C., 1996, A bus system for the 21st century, Passenger Terminal World.Spring.

Wright, L., 2000?, Latin American Busways: Moving People rather than Cars, Unpublished paper.

Wright, L., 2001, Secondary City, Primary Vision, Sustainable Transport, No. 12, Fall. ITDP.

Wright, L., 2002, Mass Transit Options, Sustainable Transport: A Sourcebook for Policy-Makers in Developing Cities. Module 3a. GTZ.

Wright, L., 2002, Bus Rapid Transit, Sustainable Transport: A Sourcebook for Policy- Makers in Developing Cities. Module 3b. GTZ.

Wright, L., Fjellstrom, K., 2003, Sustainable Transport : a sourcebook for Policy-Makers in Developing Cities, GTZ Transport and Mobility Group.

Wright, L., Fjellstrom, K., 2003, Bus Rapid Transit, GTZ Transport and Mobility Group.

Zahavi, Y., 1973, The TT-relationship : a unified approach to transportation planning, Traffic engineering and control.

Zahavi, Y., **Ryan, J.M.,** 1980, Stability of travel components over time, Transportation Research Record, n°750.

Zahavi, Y., Talavitie, A., 1980, Regularities in Travel Time and Money Expenditures, Transportation Research Record, n°750 pp13-19.

Zahavi, Y., 1980, Travel Characteristics in Cities of Developing and Developed Countries, World Bank Staff Working Paper, n°230.

Zambrano, F., 1993, Ciudad y Territorio : el proceso de poblamiento en Colombia. Santafé de

Bogotá : Academia de historia de Bogotá.

Zambrano, F., 1994**,** Desarrollo urbano en Colombia. Una perspectiva histórica, in Políticas e instituciones para el desarrollo urbano futuro en Colombia. Bogotá, Ministerios de Desarrollo Económico Departamento Nacional de Planeación.

Zegras, C., 2002, Private Sector Participation in Urban Transport Infrastructure Provision, Sustainable Transport: A Sourcebook for Policy-Makers in Developing Cities. Module 1c. GTZ.

Zhao, F., Chung, S., 2006, A study of alternative land use forecasting models, Final report, FDOT systems planning office.

Webographie

www.geoconfluences.ens-lsh.fr
www.georgiaencyclopedia.org
www.newurbanism.org
www.bogota.gov.co
www.businesscol.com/economia/precios3.htm
www.dane.gov.co
www.idu.gov.co
www.dama.gov.co
www.ministeriodelmedioambiente.gov.co
www.gobiernoenliea.gov.co
www.transmilenio.gov.co
www.cdm.unfccc.int/UserManagement
www.camacol.org.co;
www.cepal.org;
www.challenge.stockholm.se;
www.ciudadhumana.org;
www.cleanairnet.org;
www.dama.gov.co;
www.dane.gov.co;
www.dapd.gov.co;
www.eltiempo.terra.com.co;
www.encolombia.com;
www.geohive.com;
www.idu.gov.co;
www.igac.gov.co;
www.itdp.org;
www.lonjadebogota.org.co;
www.losconstructores.com;
www.metrocuadrado.com;
www.metrovivienda.gov.co;
www.transitobogota.gov.co;
www.transmilenio.gov.co;
www.uitp.com;
www.unchs.org;
www.unito.it;
www.urbanaenlinea.go.to;
www.worldbank.org
www.modelistica.com
www.rto.kar.nic.in/default.htm

La soutenabilité environnementale des transports urbains dans les villes du Sud

Le couple « transport – usage des sols » au cœur des dynamiques urbaines

L'objectif de cette thèse est d'explorer si, compte tenu des dynamiques démographiques et des faibles capacités financières, les technologies accessibles aux villes du Sud sont aptes à infléchir significativement les trajectoires des consommations énergétiques et des émissions de CO_2 liées aux transports urbains. Le **chapitre 1** récapitule ce que nous savons aujourd'hui des déterminants des consommations énergétiques liées aux transports urbains et des évolutions récentes de ces déterminants. Le **chapitre 2** discute les solutions envisageables dans les politiques de transport et d'usage des sols pour placer les villes du Sud sur des trajectoires soutenables de développement. Ces conclusions nous conduisent à examiner les interactions entre le système de transport et le système d'usage des sols sur une ville particulière, Bogota (Colombie). Le **chapitre 3** analyse le fonctionnement du couple « transport – usage des sols » au cœur des dynamiques urbaines sur le temps long, depuis la fondation de Bogota jusqu'à la fin du XX^{ème} siècle. Le **chapitre 4** étudie les effets d'une infrastructure de transport, le Bus Rapid Transit (BRT) TransMilenio, sur les marchés foncier et immobiliers, la structure urbaine et la matrice Origine-Destination des déplacements. Le **chapitre 5** évalue les outils de prospective capables de simuler différentes combinaisons des leviers d'action dont disposent les aménageurs urbains et sélectionne un modèle intégré existant (TRANUS), auquel est adossé un module de quantification des consommations énergétiques et des émissions de CO_2 (Signature Energétique des Transports Urbains, SETU). Le **chapitre 6** teste à l'aide de TRANUS-SETU la capacité des politiques de transport et d'urbanisme à infléchir les trajectoires de consommations énergétiques liées aux transports urbains sur le cas de Bangalore (Inde).

Mots clés : transport urbain, usage des sols, consommation énergétique, modélisation urbaine.

Urban transport environmental sustainability in the cities of the South

"Transport – Land Use" couple in the heart of urban structuring processes

The objective of this PhD dissertation is to explore if, in view of rapid demographic growth and limited financial capacities, the technologies accessible to poor cities can decrease trajectories of energy consumption and CO_2 emissions due to urban transportation. **Chapter 1** reviews what we already know of the determinants involved, and their recent evolutions. **Chapter 2** analyzes conceivable transport and land-use solutions that would allow southern cities to attain sustainable development trajectories. The conclusions drawn from the first two chapters led us to analyze the interactions between the transport system and land-use system on a particular city, Bogota (Colombia). **Chapter 3** studies the functional relations in the "Transport – Land Use" couple and its impact on urban space structuring processes in the long term, from the foundation of Bogota to the end of the 20th century. **Chapter 4** focus on the impact of a new transportation infrastructure – the TransMilenio Bus Rapid Transit (BRT) – on real-estate and housing markets, on urban structure and the Origin-Destination trip matrix. **Chapter 5** reviews the existing prospective tools able to simulate various combinations of realistic policies, and to measure their consequences on the levels of energy consumption and CO_2 emissions related to urban transportation. The integrated urban "Transport – Land Use" model, TRANUS, is chosen and completed with a module of of energy consumption and CO_2 emissions quantification, called "Energy Signature of Urban Transportation" (SETU). **Chapter 6** tests the capacity of these combinations of policies to affect the trajectories of the energy consumption of urban transportation through the application of TRANUS-SETU on a case study, Bangalore (India).

Key word: urban transport, land-use, energy consumption, urban model.