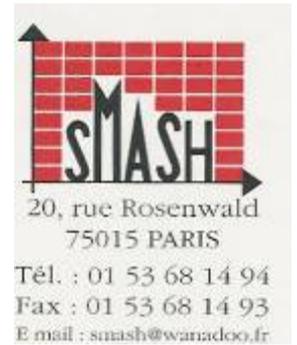




Centre de Coopération  
Internationale  
en Recherche Agronomique  
pour le Développement

Société de Mathématiques  
Appliquées et de Sciences  
Humaines



**Compétition énergie-alimentation dans l'usage des sols**

**Éléments d'analyse et de modélisation  
des perspectives globales de développement des biocarburants**

Rapport final au Conseil Français de l'Energie  
(contrat CFE 43)

04 septembre 2009

Bruno DORIN  
Thierry BRUNELLE  
Renaud CRASSOUS  
Vincent GITZ  
Jean-Charles HOURCADE  
Tristan LE COTTY

# Sommaire

<b>Sommaire</b> .....	2
<b>Sigles, Glossaire</b> .....	4
<b>Introduction</b> .....	7
<b>1. Eco-ingénierie des biocarburants</b> .....	10
<i>11. Des bénéfiques controversés, des enjeux agro-écologiques</i> .....	11
111. Introduction.....	11
112. La consommation énergétique.....	12
113. L'émission de gaz à effet de serre .....	16
114. Des controverses aux enjeux.....	18
115. Conclusion.....	20
<i>12. Enjeux agro-écologiques et enjeux de modélisation : l'interface Agropol</i> .....	22
121. Introduction.....	22
122. Les ambitions de l'outil .....	22
123. Le prototype.....	25
<b>2. Rétro-prospective des productions et usages mondiaux de biomasses alimentaires</b> .....	27
<i>21. La plateforme Agribiom</i> .....	28
211. Objectifs de l'outil .....	28
212. Organisation générale des traitements .....	30
213. Couvertures temporelle et géographique.....	31
214. Populations humaines .....	33
215. Utilisation des terres.....	34
216. Potentiels cultivables .....	36
217. Bilans ressources-emplois de biomasses alimentaires .....	38
218. Biomasses non-alimentaires .....	42
219. Modèles de productions animales.....	43
2110. Interface et simulations interactives .....	50
<i>22. Rétrospective 1961-2003</i> .....	53
221. Populations humaines .....	53
222. Consommations alimentaires .....	54
223. Occupation des terres .....	55
224. Productions et productivités alimentaires.....	57
225. Usages des produits alimentaires .....	59
226. Commerce alimentaire .....	60
<i>23. Prospectives 2050</i> .....	62
231. Des principes de scénarios .....	62
232. Des principes de bouclage .....	64
233. La situation de référence 2003.....	66
234. Simulations du scénario Agrimonde AGO.....	68
235. Simulations du scénario Agrimonde « AG1» .....	73
236. Conclusion des simulations.....	77

<b>3. Modélisation hybride de l'équilibre partiel des terres disponibles</b> .....	80
31. <i>Principes généraux du Nexus-LandUse</i> .....	81
311. Un modèle mondial d'allocation des sols .....	81
312. Le mécanisme théorique de formation du prix de la terre.....	82
313. L'intégration du Nexus-LandUse dans Imaclim-R.....	84
32. <i>Descriptif complet du prototype</i> .....	88
321. Architecture du modèle .....	88
322. Ecriture du module dynamique.....	89
33. <i>Analyse des sorties du modèle</i> .....	96
331. Tests de sensibilité.....	96
332. Résultats d'un premier exercice de projection .....	99
34. <i>Conclusions</i> .....	103
<b>ANNEXES</b> .....	104
Annexe 1. Le modèle-ingénieur Agropol.....	105
Annexe 2. Les pays Agribiom et leur classement en région MEA .....	136
Annexe 3. Les lignes CDU classées en biomasses alimentaires .....	139
Annexe 4. Les populations humaines (1961-2005) .....	141
Annexe 5. Le disponible pour l'alimentation (1961-2003).....	142
Annexe 6. L'occupation des terres (1961-2005) .....	143
Annexe 7. Les potentiels cultivables .....	144
Annexe 8. Les productions alimentaires (1961-2003) .....	145
Annexe 9. La productivité des espaces (1961-2003).....	146
Annexe 10. L'usage des produits alimentaires végétaux (1961-2003).....	147
Annexe 11. Le commerce de produits alimentaires (1961-2003) .....	149
Annexe 12. Comparaison des productions animales observées et simulées (1961-2003).....	150
Annexe 13. Principales hypothèses des simulations Agrimonde (2050).....	152
<b>Tables des figures et tableaux</b> .....	154
<b>Tables des matières</b> .....	156
<b>Références bibliographiques</b> .....	158

## Sigles, Glossaire

ACV Ecobilan	L'Analyse de Cycle de Vie (aussi appelée « écobilan ») tente de fournir un moyen efficace et systématique pour évaluer l'impact sur l'environnement naturel d'un produit, d'un service ou d'un procédé. Sa finalité première est d'aider à réduire la pression d'un produit sur les ressources et l'environnement tout au long de son cycle de vie, de l'extraction des matières premières jusqu'à la mise au rebus en fin de vie, cycle souvent qualifié de « berceau au tombeau », ou « du puits à la roue » (« <i>well to wheel</i> ») dans le cas des carburants.
AGO	Scénario Agrimonde GO : traduction et adaptation, par la prospective Agrimonde, du scénario « <i>Global Orchestration</i> » du MEA (2005)
AG1	Scénario Agrimonde 1 : traduction et adaptation, par la prospective Agrimonde, du scénario de « Révolution Doublement Verte » de M. Griffon (2006)
AM	Scénario « <i>Adapting Mosaic</i> » (« Mosaique d'adaptation ») du MEA
AQUA	Produits d'eaux douces (catégorie Agribiom de biomasse)
ASIA	Asia, Asie (selon zonage MEA)
Biocarburant	Combustible – liquide ou gazeux – produit à partir de la biomasse pour être utilisé pour le transport : bioéthanol, biodiesel, biogaz, biométhanol, biodiméthyléther, bio-ETBE, bio-MTBE, biocarburants synthétiques, biohydrogène, huile végétale pure
CDU	Comptes Disponibilité-Utilisation de la FAO (SUA en anglais : <i>Supply-Utilization Accounts</i> )
CFE	Conseil Français de l'Energie
CH <sub>4</sub>	Méthane
CIRAD	Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement ( <a href="http://www.cirad.fr">http://www.cirad.fr</a> )
CIREN	Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de carbone, gaz carbonique
E-diesel	Mélange éthanol-diesel encore peu développé car nécessitant des adjuvants ou une adaptation des moteurs (double carburateur par exemple) pour forcer la miscibilité des deux composants.
EMHV Biodiesel Diester	Ester Méthylique d'Huile Végétale (colza, tournesol, soja...) mélangé au gazole ou au fioul. Jusqu'à 5% d'incorporation, il est considéré en Europe comme un constituant du gazole, mais il peut être utilisé à des taux supérieurs : jusqu'à 30% en France dans les flottes captives, voire pur comme en Allemagne (ou en France uniquement dans les exploitations agricoles).
Eq-C Eq-CO <sub>2</sub>	Équivalent Carbone (ou CO <sub>2</sub> ) : GES émis/stockés en kilogramme équivalent carbone, ou PRG du GES x 0,2727 (poids du carbone seul dans 1 kg de CO <sub>2</sub> )
EqSCL	Equivalent Surface Cultivée Localement : grandeur que nous exprimons généralement en hectares, et que nous calculons en divisant une quantité d'aliments produite, échangée ou consommée dans une région (quantité observée, supposée ou simulée) par le rendement alimentaire des surfaces cultivées dans cette même région (rendement observé, supposé ou simulé).
ETBE	Ethyl-Tertio-Butyl-Ether obtenu en recombinaison un hydrocarbure pétrolier, l'isobutylène, avec l'éthanol, dans la proportion respective de 53 et 47%.
Ethanol Bioéthanol	Alcool éthylique obtenu par fermentation des sucres issus de produits <ul style="list-style-type: none"> <li>• amylicés : blé, maïs, pomme de terre...</li> <li>• saccharifères : betterave, canne à sucre, topinambour...</li> <li>• cellulosiques : bois et déchets de bois, pailles de céréales, tiges et rafles de maïs, bagasse de canne, roseau, cultures pérennes de graminées, taillis à rotation rapide, miscanthus...</li> </ul> <p>Il est incorporé à l'essence soit directement (le taux maximum d'incorporation pourrait passer en 2007 de 5% à 10% en France ; en 2005, il était de 5% en Suède, de 10% aux Etats-Unis, de 25% au Brésil...), soit après avoir été transformé en ETBE (taux maximum d'incorporation de 15% en France en 2005).</p>
FAO	<i>Food and Agriculture Organisation of the United Nations</i> , Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

FEED	Produits alimentaires utilisés pour l'alimentation des animaux, après transformation ou non (maïs, tourteaux d'oléagineux comestibles...)
FOOD	Produits alimentaires utilisés pour l'alimentation des êtres humains, après transformation ou non (blé, maïs, pain... huiles... fruits et légumes... lait, viandes, poissons...)
FSU	<i>Former Soviet Union</i> , ancienne Union Soviétique (selon zonage MEA)
F-T Méthanol DME	Les carburants F-T (Fischer-Tropsch), le méthanol, le DME (Éther Di-Méthylique) sont des biocarburants obtenus après liquéfaction de gaz issus de biomasses cellulosiques (méthane, monoxyde et dioxyde de carbone, nitrogène, hydrogène). Leur développement est pour l'instant empêché par leur coût trop élevé d'obtention, ou par l'absence de marché pour leur coproduits, ou encore par les adaptations techniques qu'ils nécessitent en aval.
g	Gramme
G	Giga, milliard
GAA	Group d'Appui Agrimonde
GES	Gaz à effet de serre. La vapeur d'eau est un GES, mais elle s'évacue en quelques jours de l'atmosphère, contrairement au CO <sub>2</sub> (PRG de 1), CH <sub>4</sub> (PRG réévalué de 21 à 23), N <sub>2</sub> O (PRG réévalué de 310 à 298), au perfluorocarbures (PRG de 6500 à 8700), aux hydrofluorocarbures (PRG de 140 à 11700), à l'hexafluorure de soufre (SF <sub>6</sub> au PRG de 23900).
Gkcal	Giga kilocalories, ou milliard (10 <sup>9</sup> ) de kilocalories (kcal)
GO	Scenario " <i>Global Orchestration</i> " ("Orchestration globale") du MEA
ha	hectare
IAASTD	<i>International Assessment of Agricultural Science and Technology for Development</i> Evaluation Internationale des Connaissances, des Sciences et des Technologies Agricoles pour le Développement (EICSTAD)
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique ( <a href="http://www.inra.fr/">http://www.inra.fr/</a> )
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> ou GIEC en français (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat)
j	Jour
K, k	Kilo, millier
kcal	Kilocalories
kg	Kilogramme
LAM	<i>Latin America</i> , Amérique latine (selon zonage MEA)
LSCE	Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement ( <a href="http://www.lscce.ipsl.fr/">http://www.lscce.ipsl.fr/</a> )
LULUCF UTCF	<i>Land Use, Land Use Change and Forestry</i> : Utilisation des Terres, leur Changement et la Forêt (UTCF en français)
M	Mega, million
MARI	Produits d'eaux marines (catégorie Agribiom de biomasse)
MEA	<i>Millennium Ecosystem Assessment</i>
MENA	<i>Middle East and North Africa</i> , Moyen Orient et Afrique du Nord (selon zonage MEA)
MONO	Produits de monogastriques (catégorie Agribiom de biomasse)
MTBE	Methyl-Tertio-Butyl-Ether, composé oxygéné dérivé du méthanol (obtenu par synthèse généralement avec du gaz naturel) et utilisé comme additif à l'essence. Par rapport aux biocarburants, son avantage est d'abaisser la volatilité de l'essence (45 kp) et de ne pas présenter de risque de démixtion (séparation, en présence de faibles quantités d'eau, du mélange essence-éthanol). Par contre, il s'avère nocif pour les nappes phréatiques en particulier, ce qui peut conduire à son interdiction (Californie, 2003).
N <sub>2</sub> O	Protoxyde d'azote
OCDE OECD	Organisation de coopération et de développement économiques <i>Organisation for Economic Co-operation and Development</i> , Organisation de coopération et de développement économiques (selon zonage MEA)
OS	Scenario " <i>Order from Strength</i> " ("Ordre suivant la force") du MEA

PCI PCS	Pouvoir Calorifique Inférieur. Le PCS (pouvoir calorifique supérieur) est l'énergie résultant de la combustion auquel on ajoute l'énergie que la vapeur d'eau restitue à son environnement en se condensant, alors que le PCI est l'énergie résultant de la combustion sans tenir compte de l'énergie consacrée à la vaporisation de l'eau. La différence entre le PCI et le PCS est la chaleur latente de vaporisation de l'eau ( $L_v$ ) multipliée par la quantité de vapeur produite ( $m$ ), qui vaut à peu-près 2 250 kJ/kg (cette dernière valeur dépend de la pression et de la température).
PRG	Pouvoir (relatif) de Réchauffement Global, généralement exprimé à 100 ans : combinaison de la puissance instantanée (le « forçage radiatif » : quantité de rayonnement interceptée et renvoyée vers le sol) avec la durée de séjour dans l'atmosphère.
RUMI	Produits de ruminants et gros herbivores (catégorie Agribiom de biomasse)
SCA	Surface cultivée alimentaire
SCN A	Surfaces cultivées non-alimentaires
SSA	Afrique Sub-saharienne, <i>Sub-Saharan Africa</i> (selon zonage MEA)
TBA	Tertio-Butyl-Alcool, autre composé oxygéné issu de l'industrie pétrolière.
TG	Scenario " <i>Techno Garden</i> " ("Techno jardin") du MEA
UE	Union Européenne
URS S	Union des Républiques Socialistes Soviétiques
USD A	<i>United States Department of Agriculture</i> , département de l'Agriculture des États-Unis
VANA	Valorisation agricole non-alimentaire
VEGE	Produits végétaux (catégorie Agribiom de biomasse)

# Compétition énergie-alimentation dans l'usage des sols

## Eléments d'analyse et de modélisation des perspectives globales de développement des biocarburants

### **Introduction**

Depuis 1973, plusieurs pays ont encouragé la production de biocarburants (éthanol de canne à sucre au Brésil, éthanol de maïs aux Etats-Unis, biodiesel de colza en Allemagne, France ou Italie, huile de palme en Asie du Sud-est...) au gré des chocs pétroliers mais aussi de volontés plus ou moins affirmées de soutenir l'emploi et les revenus agricoles, de lutter contre la pollution de l'air, d'évoluer vers des systèmes énergétiques plus durables. L'ensemble de ces arguments ont été réactivés au début des années 2000 dans un contexte marqué par de grandes tensions sur le marché pétrolier, la prise de conscience des implications géopolitiques de la sécurité énergétique au 21e siècle, la mise en œuvre du protocole de Kyoto, la volonté réaffirmée des Etats-Unis de percée technologique sur la séquestration de carbone et les sources alternatives aux énergies fossiles.

Aujourd'hui, la production de biocarburants n'est plus anecdotique. Et malgré des crises récentes et parfois violentes dénonçant le développement de cette production<sup>1</sup>, cette dernière pourrait, selon diverses prospectives, considérablement s'affirmer dans les décennies à venir. Mais ces prospectives invitent à d'abord surmonter au plus vite le problème classique d'articulation entre analyses *bottom-up* riches en expertises techniques, et analyses *top-down* soucieuses de représenter l'interaction et la coordination des grandes variables structurant les économies. Elles incitent également à prendre rapidement en charge trois problèmes spécifiques et interdépendants :

- (1) le coût des biocarburants ne repose pas uniquement sur des technologies pour lesquelles on peut envisager un progrès plus ou moins rapide : s'ils se développent à grande échelle, il faut aussi intégrer des contraintes d'approvisionnement en ressources telle que l'énergie fossile ou l'eau, ainsi que les coûts d'opportunité d'usage des sols (transformations de la rente foncière) ;
- (2) les potentialités ultimes des biocarburants ne peuvent être analysées indépendamment d'une prospective des besoins et consommations alimentaires en quantité comme en qualité (notamment : enrichissement des assiettes en produits d'origine animale), prospective devant être suffisamment spatialisée pour tenir compte des contraintes spécifiques à chaque pays, dont celles imposées par l'équilibre des flux d'échange (un pays déficitaire en aliments doit pour en importer dégager ailleurs des revenus d'exportation) ;
- (3) l'innovation technique se déploie sur une chaîne qui va de la phase agricole à la distribution de carburants, et met par conséquent en jeu des acteurs ayant des cultures technologiques et des logiques micro-économiques assez différentes ; en d'autres termes, la filière perçue comme optimale par l'agriculteur ou l'agronome ne l'est pas nécessairement pour l'industrie du raffinage, le constructeur automobile, ou encore le planificateur du secteur énergétique ou du secteur agricole.

---

<sup>1</sup> en 2007 et plus encore en 2008 avec l'inflation des prix alimentaires et les « émeutes de la faim »

Pour palier cette double déconnexion entre expertises d'ingénieurs et expertises macroéconomiques d'une part, expertises énergétiques et expertises agricoles d'autre part, nous avons entrepris des travaux de recherches poursuivant deux grandes ambitions :

(1) élaborer un outil de modélisation intégrée articulant économie de l'énergie et économie agricole, ceci afin d'étudier :

- la compétition entre énergie et alimentation sur l'usage des sols via la représentation des coûts d'opportunité de l'usage des terres,
- les impacts de divers systèmes d'incitation envisageables tant en matière de politique énergétique que de politique agricole ;

(2) évaluer, d'abord à l'échelle de contextes régionaux particulièrement contrastés<sup>2</sup>, la viabilité et le niveau d'émergence des principales options technologiques de biocarburants à l'horizon 2030-50, ceci à travers des scénarios qui explicitent et intègrent :

- des hypothèses sur les contraintes en facteurs de production (énergies fossiles, eau...),
- des hypothèses sur les politiques agricoles, énergétiques et climatiques,
- des visions d'experts sur les potentialités des filières et sur la façon dont divers régimes de valorisation de la bioénergie sont susceptibles de mobiliser l'ensemble des acteurs nécessaires.

Le présent rapport expose le résultat des travaux 2006-2008 réalisés dans cette direction. Ces travaux se sont agencés en trois volets qui ont chacun conduit au développement d'un outil de simulation destiné à dialoguer avec les autres.

Le premier volet (§ 1 et Annexe 1) reprend, développe et valorise deux ans de réflexion préalable au sein du programme européen INSEA<sup>3</sup> achevé en juin 2006. Il relève typiquement de l'analyse *bottom-up* et de l'approche ingénieur dans les domaines tant agricoles qu'énergétiques. Il s'attache successivement à :

- mettre en évidence – via une revue d'écobilans de biocarburants publiée en décembre 2008 (Dorin et Gitz, 2008) – l'importance de la technologie agricole dans toute réflexion et modélisation relative aux bioénergies, ceci alors qu'il existe aujourd'hui de nettes insuffisances de références sur les options actuelles et potentielles en la matière ;
- présenter le prototype du modèle-ingénieur « Agropol » visant à référencer des grandes options de production de biomasses énergétiques à travers le monde, à simuler leurs coûts et revenus dans différents contextes économiques, à dresser leur écobilan simplifié (efficacité énergétique, émission/stockage de GES...). Ce prototype aidera on l'espère un jour la vaste collecte de données primaires qu'il serait nécessaire d'effectuer pour combler les lacunes de connaissance énoncées dans cette section<sup>4</sup>.

Le second volet (§ 2 et Annexe 2 à Annexe 13) relève de l'analyse *top-down* dans le domaine de l'économie agricole et alimentaire, et plutôt encore de l'approche ingénieur. Il présente « Agribiom » et ses premiers résultats, autrement dit :

- les objectifs et les composantes d'une plateforme quantitative développée pour la retro-prospective collective et la modélisation hybride des productions, échanges et usages globaux de biomasses ;
- une rétrospective à l'échelle mondiale, et en termes caloriques, des productions, échanges et usages de biomasses alimentaires durant les quatre dernières décennies (1961-2003) ;

---

<sup>2</sup> un pays du Sud encore peu peuplé comme le Brésil, un « monde plein » comme l'Inde, un espace d'économie industrialisée comme l'Union Européenne...

<sup>3</sup> *Integrated Sink Enhancement Assessment* (<http://www.iiasa.ac.at/Research/FOR/INSEA/>)

<sup>4</sup> collecte allant bien au-delà des ambitions, des moyens et des temps accordés à ce projet

- le résultat des simulations emplois-ressources de biomasses alimentaires effectuées pour les deux scénarios de la prospective « Agrimonde : Agricultures et alimentations du monde en 2050 ». Cette prospective a été initiée par le Cirad et l'Inra en juin 2006. Elle a considérablement soutenu notre entreprise et débute en 2009 la diffusion de ses travaux et des nôtres (Agribiom) avec ce rapport et d'autres beaucoup plus développés qu'ici sur la justification et l'interprétation des scénarios (INRA et CIRAD, 2009)<sup>5</sup>.

Le troisième et dernier volet (§ 3) présente l'architecture et des premières sorties exploratoires du modèle « Nexus-LandUse » (ou « Nexus-LU »). A l'interface entre expertises d'ingénieurs et expertises macroéconomiques d'une part, économie de l'agriculture et de l'alimentation et économie de l'énergie et des transports d'autre part, ce modèle vise à représenter les interactions entre le secteur LULUCF (*Land Use, Land Use Change and Forestry*) et le reste de l'économie, à explorer *in fine* des politiques bioénergétiques sous diverses contraintes de ressources en terres. Il mobilise pour cela – et entre autres – des représentations et des résultats issues des travaux précédemment exposés (Agribiom), ainsi que le modèle macro-économique récursif Imacim-R auquel il sera bientôt couplé (avec les modèles énergétiques et technologiques *Nexus-Energie*, *Nexus-Industrie* et *Nexus-Transport*). C'est sur ce modèle en cours de développement que s'achèvera ce rapport structuré sur une double progression :

- du micro (écobilans) au macro (effets systémiques dans toute l'économie)
- de l'analyse quantitative (ingénierie puis agrégée) au modèle comportemental (Nexus-LU).

---

<sup>5</sup> Pour des résumés ou autres présentations, consulter <http://www.cirad.fr/fr/actualite/communique.php?id=1097> et <http://www.paris.inra.fr/prospective/projets/agrimonde>

# 1. Eco-ingénierie des biocarburants

Ce premier volet s'attache à synthétiser, dans un premier temps (§ 11), un ensemble de questions et controverses soulevées par l'émergence de la production de biocarburants et par la place ambitionnée pour ces derniers dans les consommations énergétiques à venir. Cette synthèse s'effectue au travers d'une revue d'écobilans de biocarburants (Dorin et Gitz, 2008)<sup>6</sup> qui montre également que ces écobilans doivent être approfondis et harmonisés sur certains aspects méthodologiques, et qu'ils demeurent restreints en nombre tout en étant largement centrés sur quelques agro-industries nord-américaines et ouest-européennes. Une importante conclusion est qu'il serait bénéfique d'élargir ces analyses à d'autres contextes, biomasses et modes agricoles de production pour deux grandes raisons :

- la recherche de réservoirs durables de bioénergies l'impose,
- le résultat des écobilans s'avère fortement sensible, d'une part aux techniques agricoles employées (motorisation, intrants chimiques, irrigation) dans des écosystèmes spécifiques (types de climat et de sol), d'autre part aux arbitrages relatifs à la valorisation des coproduits (alimentation animale, amélioration des sols, coproduction d'énergie).

Ces éléments de conclusion nous conduit à proposer, dans un second temps (§ 12), un prototype de modèle-ingénieur, « Agropol », pour référencer des grandes options de production de biomasses énergétiques à travers le monde, simuler leurs coûts et revenus dans différents environnements économiques, dresser leur écobilan simplifié (efficacité énergétique, émission/stockage de GES...). L'architecture concrète et complète de ce prototype est présentée en Annexe 1. Cet outil aurait pu fournir des données technico-économiques au modèle *Nexus-LandUse* (§ 3) comme cela était initialement envisagé au tout début de ce projet, mais cela n'a finalement pas été le cas en raison de l'importante collecte de données primaires qu'il nécessitait au préalable, collecte allant bien au-delà des ambitions, des moyens et des temps accordés à notre projet.

---

<sup>6</sup> Ce texte publié en décembre 2008 par la revue *Natures Sciences Sociétés* était précédé d'une mention signée « La Rédaction » : *Les débats autour des biocarburants, un temps présentés comme une solution à la raréfaction du pétrole et à la réduction d'émission de gaz à effet de serre, s'intensifient. Le texte que nous publions éclaire ces débats en comparant les résultats des quelques écobilans disponibles concernant la production des biocarburants. L'analyse du cycle de vie (ACV) est la méthode privilégiée par le monde industriel pour apprécier l'impact environnemental. Il souffre de nombreuses imperfections, tout comme le calcul de l'empreinte écologique chère aux ONG et, de manière générale, comme tous les indicateurs dits du 'développement durable'. Aussi, au-delà de la comparaison des divers écobilans, cet article introduit la question des méthodologies à mettre en œuvre pour l'évaluation des coûts et bénéfices de production de biocarburants au regard des enjeux agronomiques mondiaux.*

En note de bas de page N°4 du même document est par ailleurs précisé : *Cet article a été élaboré dans le cadre du projet « Compétition énergie-alimentation dans l'usage des sols : perspectives et viabilité des biocarburants » développé avec un appui financier du Conseil français de l'énergie (CFE). Il n'engage que ses auteurs et non leur institution ou bailleur de fonds.*

## 11. Des bénéfiques controversés, des enjeux agro-écologiques

### 11.1. Introduction

Au milieu des années 2000, l'Agence Internationale de l'Energie estime qu'environ 1% des surfaces cultivées sont consacrées à la production de biocarburants (liquides) et que ceux-ci substituent dans une proportion similaire notre consommation mondiale de carburants fossiles. A l'avenir, cette part pourrait considérablement augmenter<sup>7</sup>. D'ambitieux plans sont pour cela en œuvre au Brésil, aux Etats-Unis, ou encore en Europe sur la base d'un engagement fort des Etats (Tréguer, 2007). La fourniture agricole et forestière d'énergie n'est pas nouvelle depuis la révolution industrielle (Fernandes *et al.*, 2007), mais pour les biocarburants, des facteurs de diverses natures<sup>8</sup> ont encouragé puis découragé leur développement depuis leur première expérimentation au XIXe siècle en France (éthanol de betterave) et en Allemagne (huiles végétales). Parmi leurs bénéfiques apparents (Tableau 1), deux sont désormais avancés pour légitimer et encourager une croissance plus soutenue de leur production ici et là dans le monde : (i) réduire la dépendance des économies aux énergies fossiles, (ii) atténuer les émissions anthropiques de gaz à effet de serre (GES).

Dans la communauté scientifique cependant, et comme nous allons le montrer, ces deux points sont encore débattus. La plupart des auteurs impliqués mobilise pourtant une même méthodologie, celle de l'analyse de cycle de vie (ACV). Cette dernière, aussi appelée « écobilan »<sup>9</sup>, est apparue dans les années 1970 et s'utilise de plus en plus couramment dans l'industrie depuis l'apparition des normes ISO 14040. Elle est également l'objet d'une revue scientifique (*The International Journal of Life Cycle Assessment*). Elle vise à évaluer (en particulier) les impacts environnementaux d'un produit, d'un service ou d'un procédé, ceci de leur « berceau » à leur « tombe » (*cradle-to-grave*) ou, dans les cas rapportés ci-après, du champ (puits) au réservoir (*well-to-tank*) ou à la roue (*well-to-wheel*). La première étape d'une ACV consiste d'abord à définir les objectifs et le champ de l'étude ; on inventorie ensuite les flux (de matières, d'énergies, de services...) qui entrent et sortent du système considéré, puis après traduction de ces derniers en unités appropriées aux objectifs, on procède à l'interprétation des résultats.

Basé sur une revue assez large de la littérature, cet article poursuit un triple objectif : (i) rapporter les résultats d'ACV de biocarburants et expliquer leurs divergences relatives à l'économie d'énergie ; (ii) procéder de même pour les émissions de GES, (iii) élargir le débat sur les ACV et leur capacité à révéler les enjeux et arbitrages auxquels sont aujourd'hui exposées les agricultures du Nord et du Sud<sup>10</sup>.

---

<sup>7</sup> Selon l'IPCC, les bioénergies au sens large pourraient techniquement générer 441 EJ an<sup>-1</sup> à l'horizon 2050 (IPCC, 2001a: 244), voire beaucoup plus (Smeets et Faaij, 2007, Smeets *et al.*, 2007), alors qu'en 2002, elle ne fournissent que 46 EJ (13,4% de l'approvisionnement en énergie primaire), dont 70% sous forme de bois, charbon de bois, résidus de récolte et bouses abondamment utilisés tels quels dans les pays du Sud (Sims *et al.*, 2006).

<sup>8</sup> essor de la pétrochimie, accroissement de la population mondiale et des besoins alimentaires, crises et contre-chocs pétroliers, politiques nationales de soutien des revenus agricoles, de lutte contre la pollution de l'air, etc.

<sup>9</sup> S'il existe des différences de définition entre ACV et écobilan, elles ne sont pas l'objet d'un net consensus

<sup>10</sup> La partition Nord/Sud que nous entérinons ici par facilité d'écriture est assurément réductrice et par là trompeuse ; par « Sud », nous entendons néanmoins un relatif rapprochement en terme d'écosystèmes (tropicaux et subtropicaux) et de revenus (faibles par tête), ceci comparé aux pays du « Nord »...

Tableau 1. Avantages et inconvénients apparents des biocarburants

Sources : d'après, essentiellement, CES (2004) et IEA (2004)

	Avantages apparents	Inconvénients apparents
Approvisionnement énergétique	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Réduction des factures pétrolières</li> <li>• Diversification et décentralisation des approvisionnements énergétiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coûts de production et de distribution plus élevés que les hydrocarbures</li> </ul>
Agriculture Alimentation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maintien/Amélioration des revenus et/ou emplois agricoles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pression inflationniste sur le prix des produits agricoles et alimentaires</li> </ul>
Industrie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hausse de l'indice d'octane (éthanol) ou de cétane (biodiesel), meilleure lubricité (biodiesel)</li> <li>• Facilité d'utilisation (adaptation plus onéreuse des véhicules et/ou infrastructures au gaz ou à l'électricité)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Moindre pouvoir calorifique</li> <li>• Adaptation nécessaire des véhicules, carburants et/ou infrastructures au-delà de certains seuils d'incorporation, notamment (éthanol) pour palier l'instabilité du mélange avec l'eau, la corrosion plus rapide de certains métaux, l'augmentation de la volatilité et des risques associés</li> </ul>
Environnement	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Réduction des émissions de GES</li> <li>• Réduction des émissions de CO, HC, particules solides (éthanol, biodiesel), SO<sub>2</sub>, benzène, butadiène, isobutène, toluène, xylène (éthanol), soufre, composés aromatiques (biodiesel)</li> <li>• Valorisation de déchets ou sous-produits : résidus de récolte, déchets forestiers ou municipaux, petit-lait, suif, huiles ou graisses alimentaires...</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maintien/Accroissement des pollutions par les intrants agricoles, notamment de N<sub>2</sub>O par les engrais azotés</li> <li>• Augmentation des émissions de NO<sub>x</sub> (éthanol, biodiesel), composés organiques volatiles, acétaldéhydes, PAN (éthanol)</li> <li>• Augmentation possible des surfaces cultivées au détriment d'autres espaces (forêts, jachères...)</li> </ul>

### 112. La consommation énergétique

En première approche, les biocarburants rétrocedent sous forme liquide de l'énergie solaire captée par photosynthèse durant leur fabrication, et non de l'énergie fossile comme l'essence ou le diesel. Cette économie d'énergie fossile doit cependant être minorée par celle qui est mobilisée directement (via tracteurs, camions, usines...) et indirectement (fabrication d'engrais, pesticides, électricité...) pour produire et distribuer le biocarburant. L'ACV offre un cadre pour évaluer cette énergie consommée en amont ( $E_{in}$ ), rapporter cette dernière à l'énergie fournie en aval ( $E_{out}$ ), et comparer le ratio d'efficacité énergétique ainsi obtenu ( $I = E_{in} / E_{out}$ ) avec celui de l'essence ou du diesel. Ainsi, pour ADEME *et al.* (2002),  $I = 0,49$  pour l'éthanol français de blé ou de betterave contre 1,15 pour l'essence, et  $I = 0,33$  pour l'ester de colza ou de tournesol contre 1,09 pour le gazole (Tableau 2). A service égal, les biocarburants économiseraient donc de substantielles quantités d'énergie fossile (57 et 70% en l'occurrence). Divers autres auteurs confirment ces économies, mais dans des mesures généralement plus modestes, et exception faite de Pimentel et Patzek qui concluent que l'essentiel des biocarburants ont un rendement énergétique désastreux (Tableau 3). Au-delà des vives controverses que ces derniers auteurs ont suscité, controverses que certains jugent inutiles non sans argument<sup>11</sup>, ces écarts plus ou moins importants de résultats s'avèrent pour beaucoup reposer sur des choix divergents relatifs, d'une part aux coproduits, d'autre part au périmètre d'analyse.

La production des biocarburants peut en effet générer un ou plusieurs coproduits (Figure 1) valorisés en alimentation animale (tourteau d'oléagineux, drèche de céréale, vinasse...) ou ailleurs (glycérine, électricité...). L'énergie entrée dans le processus ( $E_{in}$ ) ne sert donc pas à produire que du biocarburant. Pour le calcul de  $I$ , il faut alors déduire a priori de  $E_{in}$  la fraction d'énergie mobilisée pour fabriquer ces coproduits. Cette fraction étant généralement inconnue, ADEME *et al.* ont opté pour une méthode d'allocation simple – dite « massique » – consistant à répartir  $E_{in}$  au prorata des masses de produits obtenus en sortie. Quand la masse

<sup>11</sup> En reprenant des estimations de Farrell *et al.* (2006: Fig. 2), Dale (in AI, 2006: 31-41) déduit en effet qu'en comparaison de l'essence, l'éthanol de maïs américain permet de diviser par 22 la dépendance de la production de carburant au pétrole, puisque ce biocarburant mobilise avant tout pour sa fabrication d'autres formes d'énergie fossile (charbon et gaz en l'occurrence).

de coproduits est importante, cela revient donc à affecter à ces derniers l'essentiel de  $E_{in}$  et à améliorer d'autant l'efficacité énergétique  $I$  du biocarburant. Or selon Sourie et al. (2005) ou Sadones (2006), cette méthode n'est acceptable qu'en pétrochimie où les produits obtenus sont de finalité et de densité énergétique similaires. De fait, la grande majorité des ACV de biocarburants optent pour d'autres méthodes d'allocation de  $E_{in}$ . Chacune d'elles est accompagnée d'un lot de critiques (Farrell *et al.*, 2006: supporting online materials, Hecht, 2007, Kavanagh, 2006, Larson, 2005: 117-8, Shapouri, 2002: 9-10, etc.), qu'elles se basent sur le contenu énergétique des coproduits (pouvoir calorifique, calories alimentaires), les résultats d'une modélisation thermodynamique du procédé industriel (type Aspen Plus), les valeurs de marché des coproduits ou leur valeur de remplacement par un substitut, l'énergie dépensée pour produire un substitut (e.g. tourteau de soja pour drèche) ou pour remplacer le coproduit par un substitut. On peut enfin et aussi, comme l'argumentent Patzek ou encore Woods et Bauen (2003), n'accorder aucun « crédit énergétique » aux coproduits. Ces divergences méthodologiques fournissent une première explication à la variabilité des résultats (Tableau 3), résultats tendant néanmoins à montrer que l'efficacité énergétique des biodiesels surpasse celle des actuels éthanol de céréales : ces derniers valorisent encore mal leurs coproduits dans l'alimentation animale, ou dans la cogénération d'énergie à l'instar de l'éthanol brésilien de canne à sucre avec la bagasse (WADE, 2004).

Concernant le périmètre d'analyse, dans les travaux d'ADEME et al. (2002) comme dans ceux de Shapouri (2004) et bien d'autres, il est précisé que les calculs n'intègrent par exemple pas les flux d'énergie fossile dépensée pour produire des facteurs fixes de production tels qu'équipements et bâtiments agricoles. Pour Pimentel et Patzek (2005), et plus modérément Delucci (2004), il s'agit là d'une importante lacune car dans la production américaine de maïs par exemple, de nombreux tracteurs, semoirs, épandeurs, moissonneuses et autres équipements sont mobilisés. Shapouri avait argumenté en 2004 : « l'information dans ce domaine est ancienne et dépassée : Pimentel, dans son rapport de 2003, a utilisé des données de Slesser et Lewis datant de 1979 pour évaluer l'énergie utilisée pour produire de l'acier, de l'acier inoxydable et du ciment ». Si des bases comme Ecoinvent (Frischknecht *et al.*, 2004) actualisent probablement ces données, force est de constater que l'essentiel des actuelles ACV de biocarburants délimitent pour l'instant une frontière de système excluant les facteurs fixes de production agricoles et industriels (Figure 2). Cela pose question, notamment s'il s'agit de comparer ensuite les résultats avec des biocarburants produits au Sud où dominent des agricultures moins capitalistique car beaucoup plus intensives en travail humain et animal. Dans ce dernier cas cependant (traction animale) se poseraient avec plus d'acuité encore les difficultés de calcul liées aux coproduits, ces derniers étant nombreux : production, parallèlement à la force de travail, de lait, de viande, de cuir, de bouses utilisées comme engrais ou combustible, etc. Autant de difficultés qui devraient être surmontées pour évaluer plus justement l'intérêt de biocarburants produits dans des contextes différents, au plan énergétique comme à celui des émissions en GES.

Tableau 2. Bilan énergétique des carburants et biocarburants selon l'ADEME

Source : d'après ADEME et al. (2002)

(mégajoules utilisés par mégajoules fournis)	Pétrole ↓ Essence MTBE	Pétrole ↓ Gazole	Blé Betterave ↓ Ethanol, ETBE	Colza Tournesol ↓ Huile, EMHV
Carburant « simple » (essence, gazole, éthanol ou huile)	1,15	1,09	0,49	0,20
Carburant « élaboré » (MTBE, ETBE ou EMHV)	1,32	-	0,98	0,33
Répartition par phases :				
- Culture ou extraction	0,35	0,55	0,10	0,14
- 1 <sup>ère</sup> transformation (en essence, gazole, éthanol ou huile)	0,69	0,44	0,39	0,04
- 2 <sup>ème</sup> transformation éventuelle (en MTBE, ETBE ou EMHV)	0,17	-	0,49	0,13
- Transport	0,12	0,11	(< 5%)	(< 5%)

Notes : le MTBE (*Methyl-Tertio-Butyl-Ether*) est un composé oxygéné dérivé du méthanol, l'ETBE (*Ethyl-Tertio-Butyl-Ether*) combine l'éthanol (47%) avec l'isobutylène (53%), et l'EMHV est l'Ester Méthylique d'Huile Végétale.

Figure 1. Processus de fabrication des biocarburants

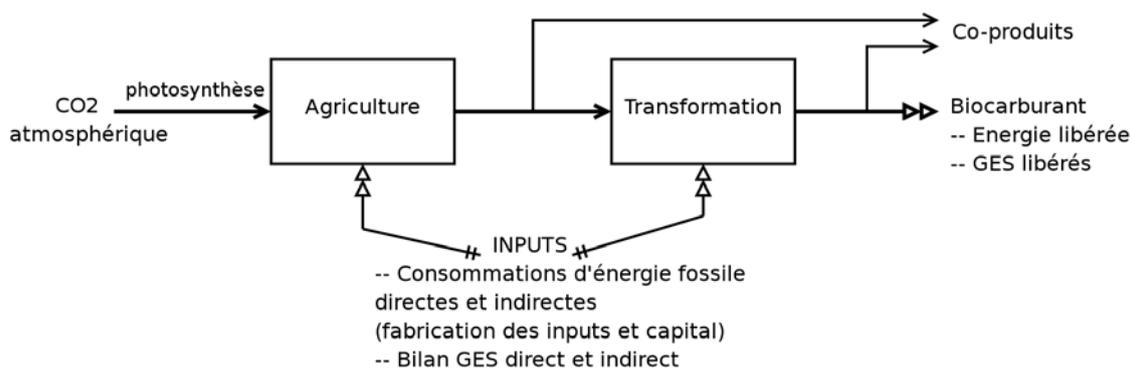


Figure 2. Choix et possibles options de délimitation d'une ACV sur l'éthanol de maïs

Source : d'après Wang (2005: Fig. 16)

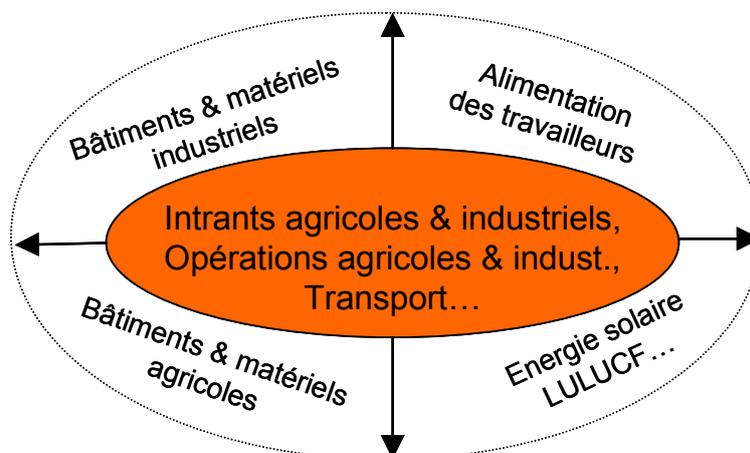


Tableau 3. Bilan énergétique et bilan effet de serre des biocarburants de 1<sup>ère</sup> génération

Biomasse	Auteurs	Année	Région	[1]	[2]	[3]
<b>1. Ethanol</b>						
Maïs (grain)	(GMC <i>et al.</i> , 2001) in (IEA, 2004)	2001	USA	0,50-0,55 (54%)		3100 (USA c.2002)
	Wang in (IEA, 2004)	2001	USA	0,54-0,57 (52%)	32-25%	
	(Shapouri, 2004)	2004	USA	0,57-0,64 (47%)		
	Levelton in (IEA, 2004)	2000	Canada	0,67 (42%)	38%	
	Marland in (IEA, 2004)	1991	USA	0,78 (32%)	21%	
	(Hill <i>et al.</i> , 2006) (Tilman <i>et al.</i> , 2006)	2006	USA	0,80 (30%)	12%	
	(Graboski, 2002)	2002	USA	0,83 (28%)		
	Levy in (CONCAWE, 2002) in (IEA, 2004)	1993	UE	0,85-0,95 (22%)	33-30%	
	(Oliveira <i>et al.</i> , 2005)	2005	USA	0,91 (21%)		
	(Pimentel et Patzek, 2005)	2005	USA	1,29 (- 12%)		
	(Pimentel, 2001) in (IEA, 2004)	2001	USA	1,65 (- 43%)	- 30%	
Blé (grain)	(Elsayed <i>et al.</i> , 2003) avec références 1996	2003	UE	0,43-0,50 (60%)		2500 (UE c.2002)
	(ADEME <i>et al.</i> , 2002)	2002	UE	0,49 (57%)	60%	
	Levy in (CONCAWE, 2002) in (IEA, 2004)	1993	UE	0,81 (30%)	32-35%	
	(Sourie <i>et al.</i> , 2005)	2005	UE	0,84 (27%)		
	(Richards, 2000) in (CONCAWE, 2002) in (IEA, 2004)	2000	UE	0,90 (22%)	29%	
	(Punter <i>et al.</i> , 2004)	2004	UE	0,90 (22%)	7-37%	
	ETSU in (CONCAWE, 2002) in (IEA, 2004)	1996	UE	0,98 (15%)	47%	
	(Woods et Bauen, 2003)	2003	UE	0,60-1,45 (11%)		
	UE in (CONCAWE, 2002) in (IEA, 2004)	1994	UE	1,03 (10%)	19%	
	Gover & al in (Jeuland <i>et al.</i> , 2004)	1996	UE	1,07 (7%)	41%	
UE in (Jeuland <i>et al.</i> , 2004)	1994	UE	1,26 (- 10%)	1%		
Betterave à sucre	(ADEME <i>et al.</i> , 2002)	2002	UE	0,49 (57%)	61%	5500 (UE c.2002)
	(Elsayed <i>et al.</i> , 2003) à partir Kaltschmitt & al 1997	2003	UE	0,45-0,54 (57%)		
	UE in (CONCAWE, 2002) in (IEA, 2004)	1994	UE	0,64 (44%)	50%	
	(GM, 2002) in (IEA, 2004)	2002	UE	0,65 (43%)	41%	
	(Woods et Bauen, 2003)	2003	UE	0,62-0,74 (41%)		
	Levy in (CONCAWE, 2002) in (IEA, 2004)	1993	UE	0,56-0,84 (39%)	56-35%	
	(Sourie <i>et al.</i> , 2005)	2005	UE	0,78 (32%)		
UE in (Jeuland <i>et al.</i> , 2004)	1994	UE	0,96 (17%)	25%		
Canne à sucre	(Macedo <i>et al.</i> , 2002) in (IEA, 2004)	2002	Brésil	0,12 (90%)	92%	6500 (Brésil c.2002)
	(Oliveira <i>et al.</i> , 2005)	2005	Brésil	0,27 (77%)		
	(Pimentel et Patzek, 2007)	2007	Brésil	0,72 (37%)		
	(Pimentel et Patzek, 2007)	2007	USA	0,89 (23%)		
<b>2. Biodiesel</b>						
Colza (grain)	(ADEME <i>et al.</i> , 2002)	2002	UE	0,33 (70%)	78%	1200 (UE, c.2002)
	(GM, 2002) in (IEA, 2004)	2002	UE	0,33 (70%)	49%	
	(Richards, 2000) in (CONCAWE, 2002) in (IEA, 2004)	2000	UE	0,40 (63%)	58%	
	(Elsayed <i>et al.</i> , 2003) à partir Kaltschmitt & al 1997	2003	UE	0,41-0,46 (60%)		
	Sharmer in (CONCAWE, 2002) in (IEA, 2004)	1996	UE	0,41-0,55 (56%)	66-56%	
	(Woods et Bauen, 2003)	2003	UE	0,53 (51%)		
	Levy in (CONCAWE, 2002) in (IEA, 2004)	1993	UE	0,52-0,57 (50%)	48-44%	
	ETSU in (CONCAWE, 2002) in (IEA, 2004)	1996	UE	0,82 (26%)	56%	
Tournesol (grain)	(ADEME <i>et al.</i> , 2002)	2002	UE	0,32 (71%)	83%	1000 (UE, c.2002)
	(Pimentel et Patzek, 2005)	2005	USA	1,96-2,18 (- 90%)		
Soja (fève)	(Hill <i>et al.</i> , 2006) (Tilman <i>et al.</i> , 2006)	2006	USA	0,52 (52%)	41%	500 (USA, c.2002)
	(Pimentel et Patzek, 2005)	2005	USA	1,08-1,27 (- 8%)		
Palmier	Azevedo, Kaltner in (WWI, 2006)	?	?	0,11 (90%)		

Légende :

[1] Energie dépensée / énergie fournie, du champ à la roue en règle générale (entre parenthèses : économie d'énergie par rapport à un ratio de 1,15 pour l'essence et 1,09 pour le gazole d'après ADEME, 2002)

[2] Réduction d'émission de GES (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O et CH<sub>4</sub> en E<sub>q</sub>CO<sub>2</sub>) par kilomètre parcouru, par rapport à un véhicule « classique » (essence ou diesel selon les cas), du champ à la roue en règle générale

[3] Rendement typique en litre de biocarburant par hectare (circa 2002) d'après IEA (2004: 127), aux Etats-Unis (USA), Union Européenne (UE) ou Brésil

### 113. L'émission de gaz à effet de serre

Après une analyse standardisée de 6 ACV d'éthanol de maïs américain, Farrell et al. (2006) concluent qu'à l'exception de travaux de Pimentel et Patzek, les autres études (celles de Graboski, Oliveira, Wang et Shapouri) montrent une moindre consommation d'énergie fossile par rapport à l'essence alors que l'émission de GES serait quasi identique. A ce dernier niveau, les biodiesels apparaissent bien plus avantageux, à côté de l'éthanol de canne brésilien et sa cogénération d'énergie (Tableau 3). Comme l'expliquent Hill et al. (2006), la filière biodiesel consomme non seulement moins d'énergie fossile émettrice de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), notamment durant la phase de transformation industrielle (Tableau 2), mais également moins d'intrants agricoles tels que les engrais azotés qui libèrent du protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) à pouvoir de réchauffement global (PRG) 310 fois supérieur au CO<sub>2</sub> (23 pour le méthane – CH<sub>4</sub>). Mais à cette moindre consommation d'intrants est aussi associée une moindre productivité de carburant par hectare (Tableau 3)<sup>12</sup> : un handicap certain (besoin de terres plus important pour produire autant) que certains relativisent : coproduction d'aliments pour animaux représentant autant d'espace gagné, pouvoir calorifique plus élevé des huiles, etc. Ce débat entre filières révèle une problématique centrale du changement climatique : l'intensification de l'agriculture augmente d'un côté les rendements de biomasse par hectare (photosynthèse plus importante, déforestation évitée...), mais restitue de l'autre des quantités croissantes de GES (N<sub>2</sub>O en particulier, via les engrais azotés) auxquelles s'ajoutent généralement ensuite celles considérables de l'élevage (Steinfeld *et al.*, 2006) qu'une partie de cette biomasse permet d'alimenter et de développer. Filières (végétales, animales) et itinéraires techniques (plus ou moins intensifs) ne peuvent donc être pensés indépendamment (CGGREF, 2006). En France, cette combinaison de filières et d'itinéraires conduit l'agriculture, formatée par un système alimentaire en aval et agroindustriel en amont, à une émission de GES représentant 17% des émissions nationales en 2003, voire 26% (devant les transports à 21%) selon le type de comptabilité (CITEPA, 2005a, b: 92). Le résultat de cette combinaison mérite réflexion, réflexion transcendant largement celle aujourd'hui focalisée sur les possibilités de réduction de GES par les biocarburants.

Par delà ces considérations demeure une incertitude notoire sur les estimations de GES agricoles, spécialement de N<sub>2</sub>O. Punter et al. (2004) et d'autres soulignent en effet que ces émissions de N<sub>2</sub>O impactent fortement le bilan GES global en raison du PRG élevé (310) tout en variant grandement suivant le climat, le type de sol et bien sûr l'itinéraire technique (Tableau 4). Trois grandes options se présentent aujourd'hui pour évaluer ces émissions : (1) extrapoler des résultats de mesures effectuées au champ dans le cadre d'itinéraires et de contextes agro-climatiques tous spécifiques, (2) mobiliser un modèle biophysique alimenté par de telles mesures pour simuler d'autres situations, (3) appliquer méthode et coefficients génériques fournis par l'IPCC (IPCC, 1996, 2001b). Des auteurs ont comparé le résultat de ces options. Pour ADEME (2002) dont l'évaluation de base repose sur des données anglo-saxonnes (Skiba) provenant d'un nombre limité d'essais effectués avant 1996, l'option IPCC conduit à augmenter significativement les émissions de GES des filières biocarburants : +40-50% pour l'ester de colza ou tournesol, et +10-20% pour l'éthanol de blé (pas de changement significatif avec la betterave). Mais CONCAWE (2004) affirme de son côté que la plage d'incertitude des résultats telle qu'indiquée par l'IPCC (1996) peut être largement dépassée dans le cas de mesures au champ (jusqu'à 10 fois la valeur maximum indiquée par l'IPCC).

---

<sup>12</sup> d'autant plus qu'il est impératif, pour des raisons agronomiques, d'alterner régulièrement les cultures oléagineuses avec d'autres

Son modèle GREASE conduit par ailleurs à des valeurs moyennes d'émission sensiblement supérieures à celles d'études basées sur l'option IPCC, notamment en raison de simulations sur sols très riches en matières organiques. Enfin, par une approche très différente elle aussi sujette à discussion, un prix Nobel de chimie (Crutzen *et al.*, 2007) invite à réviser considérablement à la hausse les coefficients d'émission en N<sub>2</sub>O agricoles de l'IPCC. En attendant, puisque pratiques agricoles et contextes pédoclimatiques déterminent en grande partie le résultat des bilans, Farrell *et al.* (2006) ou encore Larson (2005) appellent à multiplier études et références en la matière plutôt que tergiverser sur quelques résultats.

Larson insiste également avec Delucchi (2004) sur l'importance d'intégrer les émissions de gaz à effet climatique indirect (NO<sub>x</sub>, CO...) comme l'a par exemple tenté Kadam (2002) en Inde, et plus encore la dynamique du carbone des sols curieusement exclue de la très grande majorité des actuels écobilans de biocarburants. Cette dynamique est affectée par le changement d'occupation des terres (déstockage de carbone après mise en culture de forêts, de pâtures, voire de jachères) qui dépend lui-même des marchés et des politiques, mais aussi des pratiques culturales, ce qui corrobore l'importance d'intégrer ces dernières dans les réflexions et prospectives relatives au climat. Des auteurs comme McCarl et Schneider (2001) ou Smith *et al.* (2007) s'y essaient même si l'éventail de données pour conduire de tels exercices demeure pour l'instant limité. Pour Lal (2004), la réduction des émissions de GES – tout comme le plus grand stockage de carbone dans les sols – passe d'abord par le non-labour, la gestion intégrée et économe d'engrais et de pesticides, l'irrigation au goutte-à-goutte ou souterraine (techniques économisant autant l'eau que l'énergie pour la pomper et la distribuer).

Tableau 4. Principaux facteurs d'émissions de GES par l'agriculture

Cadre d'inventaire du GIEC	Facteurs d'émission	Emission principale	Commentaires
Secteur «LULUCF» (IPCC, 2003)	Mise en culture de jachères, de prairies permanentes, de forêts...	C	- Δ suivant climat et type de sol - déstockage de C stocké dans le sol - déstockage de C stocké dans la biomasse souterraine et aérienne (1 m <sup>3</sup> bois = 1 tonne CO <sub>2</sub> ) - Δ suivant l'usage et l'effet de substitution de la biomasse extraite (bois d'œuvre, bois de chauffe...)
Secteur «Agriculture» (IPCC, 2001b: chapitre 4)	Brûlage de savane ou déchets agricoles	CO <sub>2</sub>	
	Culture de riz	CH <sub>4</sub>	- ∇ avec drainage
	Émissions des sols	N <sub>2</sub> O	- Δ suivant climat et sol (↗ avec teneur en matière organique du sol) - ↗ avec épandage engrais minéraux - ↗ avec pâture d'animaux ou épandage de fumure organique - ↗ avec épandage de résidus - ↗ avec culture de légumineuses
	Gestion des déjections animales	CH <sub>4</sub> N <sub>2</sub> O	- ↗ avec température extérieure - Δ suivant pratique (stockage liquide ou solide, épandage journalier ou laissé sur pâture...)
Secteurs «Energie», «Industrie»... ou hors cadre	Fermentation entérique	CH <sub>4</sub>	- ↗ avec cellulose de la ration
	Utilisation d'énergie fossile à la ferme	CO <sub>2</sub>	- Traction, Irrigation, Moisson, Séchage... - Chauffage, Réfrigération...
	Production des facteurs de production	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O	- Engrais, Pesticides, Aliments pour animaux..., Énergie - Bâtiments, Matériels...
	Transports	CO <sub>2</sub>	- Marchandises, équipement et hommes - En amont voire en aval de la phase de production - Local, national, international

Légende : les émissions de carbone (C), dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), méthane (CH<sub>4</sub>) ou protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) répertoriées ou non comme « agricoles » par le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) varient considérablement (Δ), diminuent (∇) ou augmentent (↗) suivant les éléments mentionnés

Comparer l'impact environnemental de produits concurrents (ex. carburants fossiles/agricoles, éthanol/biodiesel...) à service rendu équivalent (ex. kilomètre parcouru) n'est en pratique pas si aisé. Les écobilans s'y essaient et deviennent pour cela de curieux objets. D'un côté, et comme précédemment illustré, leur mise en œuvre et leurs conclusions s'avèrent dépendre non seulement du service considéré, mais aussi de co-services (coproduits) pouvant ou non être pris en compte, des objectifs poursuivis (comparaison de substituts, d'options technologiques, de sites de production...), du périmètre d'analyse (systèmes plus ou moins limités verticalement et horizontalement...), de la nature et de l'étendue des indicateurs utilisés pour mesurer « l'impact environnemental » (consommation de ressources fossiles, effet de serre, biodiversité...), des bases de calcul, d'interprétation et de pondération de ces indicateurs. Cette relativité de méthodes et de résultats effraye et nécessite dans tous les cas d'afficher à chaque fois tous les éléments qui permettent de la juger et de la débattre. Trop techniciste pour certains (économistes...), trop simpliste pour d'autres (agronomes...), cet outil technico-économique de l'écologie industrielle est l'objet de multiples autres critiques (coût de réalisation, incertitude des résultats, etc.).

D'un autre côté cependant, la variabilité et la complexité des systèmes tant anthropiques qu'environnementaux ne peuvent être ignorées ou gommées, tout comme les besoins d'éco-évaluations ou d'éco-conceptions (Roux *et al.*, 2005) de produits, services ou politiques. Les écobilans et leur multiplication peuvent alors apparaître comme de puissants moteurs pour tout à la fois (i) mobiliser et faire dialoguer des approches appartenant à des secteurs et des champs de connaissances très divers, (ii) générer des références et des questionnements là où il n'en existe actuellement pas ou peu, comme s'y attachent Basset-Mens (2005) et d'autres. C'est à ce moteur intégratif que nous aimons croire, dans le cadre d'une démarche visant à mieux comprendre et maîtriser les univers techniques qui structurent les rapports entre les activités humaines et l'environnement biophysique naturel et construit. Dans cette perspective, la suite et fin de cet exposé s'attache à poursuivre et élargir la discussion engagée sur les écobilans de biocarburants, autour de six points soulignant autant leurs limites actuelles que des perspectives de développement.

(1) Rares sont les écobilans de biocarburants étendant leur analyse à d'autres impacts environnementaux que l'émission directe de GES, et les quelques tentatives dans ce sens, comme celles d'ADEME et al (2002), Blotnitz et Curran (2007) ou Galbraith et al. (2006), se concluent sur beaucoup d'incertitudes ou d'inconnues, que ce soit en terme de consommation en eau<sup>13</sup>, de biodiversité, d'eutrophisation, d'acidification de la basse atmosphère, de destruction de la couche d'ozone ou de pollution photochimique, de toxicité terrestre et aquatique, etc. Mais la phase agricole s'avère ici encore déterminante voire handicapante comparée aux filières fossiles (Zah *et al.*, 2007), ceci alors que méthodes et références pour procéder aux diagnostics agro-environnementaux demeurent incomplètes ou expérimentales (Bochu, 2002, Cunningham *et al.*, 2003, Doublet, 2006, EEA, 2005, Frischknecht *et al.*, 2004, Vilain, 2000, etc.).

(2) Le développement et l'affirmation de ces diagnostics permettraient pourtant – et aussi – de mieux arbitrer la valorisation des résidus de récolte. Leur utilisation à des fins énergétiques est en effet maintenant encouragée, notamment pour améliorer l'efficacité énergétique des

---

<sup>13</sup> sur le sujet, voir également Bordet et Michez (2006) ou encore Roberts et al. (2007), Fraiture et al. (2008)

filières actuelles d'éthanol de céréales (cf. supra). Ceci nourrit diverses spéculations à l'échelle planétaire (De La Torre Urgate in Hazell et Pachauri, 2006, IEA, 2004: 140, WWI, 2006: 12) d'autant plus que les techniques de transformation des biomasses ligno-cellulosiques pourraient bientôt s'avérer plus performantes et rentables (biocarburants de 2<sup>nd</sup>e génération valorisant la plante entière)<sup>14</sup>. Lal (2005) averti cependant : l'exportation systématique de toutes les biomasses aériennes hypothéquerait la qualité des sols puisque les résidus actuellement laissés sur champ favorisent le stockage de carbone organique, stimulent l'activité et la diversité des faunes souterraines, atténuent l'érosion ou les pollutions, concourent finalement à soutenir des rendements agricoles élevés et durables.

(3) Dans de nombreuses situations au Sud où l'on oublie fréquemment que la combustion de résidus de récolte par les ménages économise de l'énergie fossile, ces résidus servent également à alimenter les animaux, pour finalement fournir des produits et services (trait, lait, viande, œufs, cuir, laine, bouse, etc.) au rendement énergétique et à impact écologique peut-être inférieurs aux élevages industriels. Mais les différences de productivité par animal et l'actuelle restriction d'écobilans dans le domaine (Castellini *et al.*, 2006, Meul *et al.*, 2007, S.N. Mishra et Dikshit, 2004, Ogino *et al.*, 2007...) ne permettent pas, là encore, de conclure. Elobeid *et al.* (2006) avertissent parallèlement qu'un développement accentué aux Etats-Unis des surfaces de maïs énergétique se fera au détriment des productions de porc et de volaille, ainsi que des exportations de tourteaux de soja qui alimentent désormais de nombreux élevages dans le monde. Les produits animaux deviendraient donc plus onéreux dans nos assiettes, ce qui amène une question posée par d'autres : peut-on vraiment nourrir correctement et durablement à la fois 9 milliards d'humains à l'horizon 2050 et au moins trois fois plus de têtes en animaux d'élevage<sup>15</sup> (Collomb, 1999, Dorin et Landy, 2002, Griffon, 2006, MEA, 2005, Parmentier, 2007, Smil, 2000) ? Pour Pretty *et al.* (2005) ou encore Eshel et Martin (2006), nos modes occidentaux d'alimentation sont déjà coûteux pour le climat : aux Etats-Unis, un régime non végétarien émettrait 1 485 kg d'E<sub>q</sub>CO<sub>2</sub> de plus par personne qu'un régime végétarien fournissant la même quantité de calories, soit 6% des émissions nationales de GES. N'oublions pas cependant que ces animaux peuvent fournir d'autres services qu'alimentaires (traction, cuir, fertilisants, etc.) tout en valorisant des espaces comme les prairies dont on connaît la grande importance pour les réservoirs en carbone, biodiversité et eau.

(4) Malgré une hausse des coûts de production pour les éleveurs, le développement des biocarburants pourrait globalement profiter à l'agriculture, en retournant durablement la tendance baissière des prix à la ferme observée pendant plusieurs décennies à l'échelle internationale, mais aussi en créant des emplois dans le secteur. Pour la France cependant, le gain économique net du programme biocarburants n'est pas si évident pour Sourie *et al.* (2005) avec, pour l'agriculture, un surplus qui s'effondrerait dès que les cultures énergétiques s'étendent des jachères aux actuelles terres alimentaires. Pour les sociétés au Sud, le bilan économique pourrait être plus favorable, notamment parce que la production locale de biocarburants améliorerait l'accès à l'énergie des populations en zones rurales (De La Torre Urgate in Hazell et Pachauri, 2006, Schmidhuber, 2007). Mais ce bénéfice reste suspendu à diverses conditions (Dufey, 2006, Kojima et Johnson, 2005), notamment deux : (i) la non captation des profits par de gros complexes agroindustriels, (ii) l'augmentation concomitante des productivités à l'hectare. A défaut, comme le simulent Rosegrant *et al.* (in Hazell *et*

---

<sup>14</sup> pour un exposé approfondi, voir Cormeau et Gosse, in Tréguer (2007)

<sup>15</sup> Selon Faostat, le stock de ces animaux dépasserait 20 milliards de têtes en 2000, dont 3,3 de gros herbivores et/ou ruminants

Pachauri, 2006) avec le modèle IMPACT de l'IFPRI, les conséquences sur la sécurité alimentaire des populations seraient dramatiques, tout spécialement en Afrique Subsaharienne.

(5) Cette perspective de conflit d'usage des terres entre alimentation et énergie inquiète aussi Rainelli (2007) même si la source ligno-cellulosique devient rentable. Inquiétude partagée par d'autres qui en viennent, pour cette raison et des considérations écologiques, à préconiser le développement des biocarburants sur les terres « marginales » (i.e. de trop faible qualité de sol ou autre pour la production alimentaire) via des espèces herbacées ou arborées nécessitant peu d'intrants (Hill *et al.*, 2006, Oliveira *et al.*, 2005). D'après Tilman et ses collègues (2006), le rendement en bioénergie d'une combinaison de 18 espèces herbacées établies sur des sols peu fertiles ou dégradés serait, après une décennie, 238% supérieur à celui des actuelles productions de biocarburant, ceci avec peu d'engrais et traitements chimiques (cultures « LIHD » pour *Low Input – High Diversity*) et sans éroder la biodiversité des flores et faunes locales.

(6) Lupin, pâturin, fétuque, pourghère (*jatropha*), miscanthus, panic (*switchgrass*) ou combinaison plus sophistiquée d'espèces sur terres marginales : ces solutions ne seront effectives que si leur rentabilité s'avèrent démontrée, pour le paysan comme pour l'industriel dont le bassin d'approvisionnement ne peut être trop dispersé en raison des coûts de transport. Pour l'heure, c'est plutôt une expansion à grande échelle des cultures énergétiques les plus rentables qui s'organise : canne à sucre et soja en Amérique du Sud, huile de palme en Asie du Sud-est. Cette dynamique au Sud encouragée par une demande solvable croissante de biocarburants du Nord ne peut à son tour qu'encourager une déforestation accrue des forêts tropicales, directement ou par effet domino. Or la conservation des forêts tropicales est un élément clef dans la préservation du système climatique (Gitz et Ciais, 2004, Stern, 2006). Pour le bilan (équivalent) carbone, au Brésil, la canne consacrée à la production d'éthanol éviterait d'émettre  $2 \text{ tC ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  (plus de 4 selon Macedo, 1998) alors que la mise en culture d'une forêt tropicale déstocke 156 à 305  $\text{tC ha}^{-1}$  (forêt secondaire / primaire), et que l'afforestation permet de son côté d'emmagasiner 4 à 8  $\text{tC ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  (Righelato et Spracklen, 2007).

### 115. Conclusion

Les actuels écobilans de biocarburants permettent de rapporter un ensemble de questions soulevées par l'émergence et la possible grande extension à venir de ces productions énergétiques. Ces questions sont nombreuses et profondément complexes. Elles le seraient bien moins si ces mêmes écobilans parvenaient à dépasser deux de leurs limites actuelles : (i) des divergences d'ordre méthodologique et des difficultés d'accès aux données de base qui ne facilitent ni la comparaison des résultats, ni leur appropriation par d'autres alors que les économistes – en particulier – gagneraient à les intégrer dans leur raisonnement (Delucchi, 2004) ; (ii) une restriction en nombre qui plus est largement centrée sur quelques agro-industries nord-américaines et ouest-européennes. Cette double restriction est inquiétante s'il s'agit d'identifier ou d'imaginer des systèmes durables de productions bioénergétiques au Nord comme au Sud de la planète, puisque le résultat des écobilans (efficacité énergétique, émissions de GES, etc.) s'avère fortement dépendre, d'une part des techniques agricoles employées (motorisation, intrants chimiques, irrigation) dans des écosystèmes donnés (types de climat et de sol), d'autre part d'arbitrages relatifs à la valorisation des coproduits (production animale, qualité des sols, production d'énergie). Il serait donc bénéfique d'élargir

grandement ces actuels écobilans à d'autres contextes, biomasses et modes agricoles de production.

En attendant, si les actuelles productions occidentales de biocarburants apparaissent encore peu performantes aux plans énergétique et climatique (en particulier celles issues de cultures céréalières motorisées et utilisant des niveaux élevés d'intrants chimiques), il faut leur reconnaître un mérite indéniable : celui d'avoir suscité dans le secteur agricole des analyses et réflexions en terme d'écobilans. C'était urgent. Mais Il reste encore beaucoup à faire dans le domaine pour mieux penser, sous diverses contraintes pédoclimatiques et économiques, ici et là dans le monde, les productions à venir de biomasses alimentaires et non-alimentaires. Ce dernier demi-siècle de « modernisations » ou de « révolutions vertes » agricoles, basé sur une énergie fossile bon marché et une quasi-absence de préoccupation écologique appelle de profondes réformes. Il s'agit d'inventer (ou de redécouvrir et d'améliorer) des agricultures ou des agroforesteries qui, dans leur écosystème respectif, et par des combinaisons judicieuses d'espèces végétales et animales, permettent d'extraire et de valoriser durablement les plus grandes quantités possibles de biomasses.

## 12. Enjeux agro-écologiques et enjeux de modélisation : l'interface Agropol

### 121. Introduction

Les développements du chapitre précédent soulignent que les actuels écobilans de biocarburants doivent être approfondis et harmonisés sur certains aspects méthodologiques, et qu'ils demeurent restreints en nombre tout en étant largement centrés sur quelques agro-industries nord-américaines et ouest-européennes. Une importante conclusion est qu'il serait bénéfique d'élargir ces analyses à d'autres contextes, biomasses et modes agricoles de production pour deux grandes raisons :

- la recherche de réservoirs durables de bioénergies l'impose,
- le résultat des écobilans s'avère fortement sensible non seulement aux arbitrages relatifs à la valorisation des coproduits (alimentation animale, amélioration des sols, coproduction d'énergie), mais aussi aux techniques agricoles employées (motorisation, intrants chimiques, irrigation) et aux écosystèmes (types de climat et de sol) dans lesquelles ces techniques sont mises en œuvre.

En d'autres termes, il serait bénéfique d'irriguer les réflexions et modélisations tant économiques qu'environnementales avec un portefeuille de technologies agricoles (« itinéraires techniques » ou « conduites culturales ») beaucoup plus fourni que celui aujourd'hui utilisé pour les exercices. Cela permettrait non seulement de beaucoup mieux représenter la grande diversité actuelle de ces technologies à l'échelle mondiale (technologies au contenu très varié en énergie fossile, en intrants chimiques, en travail humain et animal...), mais aussi de mieux appréhender et simuler *in fine* de possibles options d'avenir et/ou de possibles sauts technologiques (passage d'archétypes technologiques dominants à d'autres) après évolution ou changement d'environnement économique (prix de l'énergie fossile, de l'eau ou de la main d'œuvre, taxe carbone, etc.).

Ces éléments de conclusion nous ont conduit à élaborer un prototype de modèle-ingénieur, « Agropol », pour référencer des grandes options de production de biomasses énergétiques à travers le monde, simuler leurs coûts et revenus dans différents environnements économiques, dresser leur écobilan simplifié (efficacité énergétique, émission/stockage de GES...), ceci dans une perspective de modélisation plus vaste.

### 122. Les ambitions de l'outil

Agropol a été structuré pour remplir les 5 objectifs exposés ci-après.

(1) Référencement et description technico-économique de conduites agricoles ou forestières

La première ambition de l'instrument est de permettre d'enregistrer :

- les principales caractéristiques de l'environnement écologique et économique où se déroule une production observée de biomasse : pays, archétypes de climat, de sol, d'altitude, de taille d'exploitation (...), prix des énergies fossiles et humaines, taux d'intérêt et d'actualisation ;
- les types et les volumes de facteurs (équipements, travail humain et animal, intrants) associés simultanément à une conduite technique (description d'une séquence d'opérations sur quelques mois ou plusieurs années) et à ses rendements (volumes de produits et coproduits d'une monoculture, de cultures associées, d'une rotation de cultures, d'un atelier d'élevage, etc.).

Cette saisie d'informations doit être suffisamment précise pour permettre partout dans le monde les diverses estimations envisagées par la suite, mais aussi suffisamment simple et condensée pour, d'une part s'adapter aux divers langages et connaissances mobilisables (agriculteurs, experts, observatoires...), d'autre part réduire au strict nécessaire les temps d'enregistrement.

## (2) Évaluation standardisée des coûts et des marges

Avec des formules standardisées de calculs, l'ambition de l'outil est ensuite d'évaluer, sur la base des volumes de facteurs et de produits précédemment renseignés, mais aussi avec le concours de base de données complémentaires comme TRAME (BCMA, 2004) :

- les coûts fixes (amortissement, intérêt sur valeur résiduelle du capital immobilisé, taxes, assurances, remisage),
- les coûts variables (travail humain et animal, semences ou plants, fumures organiques, engrais chimiques, produits phytosanitaires, irrigation, carburant et électricité, réparations et maintenance),
- et les marges (brutes, nettes...) des conduites techniques précédemment décrites.

Cette évaluation peut mobiliser des prix unitaires renseignés soit au moment de la saisie, soit par le modélisateur (utilisation de bases de données extérieures propres ou non au pays considéré). Dans tous les cas, l'outil doit être en mesure de réévaluer coûts et revenus d'un paquet technique après changement ou évolution d'un paramètre économique important (prix de l'énergie, prix d'une matière première, niveau de salaire, taux d'intérêt, etc.). Il doit aussi permettre d'exprimer les résultats suivant différentes devises pour faciliter les comparaisons.

## (3) Interfaçage avec des modèles biologiques ou biophysiques

A partir de quelques cas observés dans la réalité, il doit également être possible de recourir à des modèles biologiques ou biophysiques pour obtenir des données qu'on ne pourrait obtenir autrement (un type de conduite observée dans une région n'est pas obligatoirement observable dans une autre), ou tout simplement pour éviter un abyssal temps de collecte des multiples variantes de production de telle ou telle biomasse. L'instrument ambitionne donc aussi d'offrir la possibilité :

- de nourrir des modèles biophysiques comme EPIC<sup>16</sup> qui, pour les cultures, permettent de ré-estimer les rendements après changements de divers paramètres (type de climat ou de sol, niveau de fertilisation azotée ou d'irrigation, labour ou non-labour, rotations...);
- de recalculer les coûts et marges de ces paquets techniques plus ou moins virtuels.

## (4) Évaluation standardisée d'externalités environnementales

Une ambition plus originale et plus complexe de l'instrument est d'évaluer, suivant des méthodes reconnues et relativement peu gourmandes en données<sup>17</sup>, les externalités environnementales de paquets techniques agricoles ou forestiers (émissions/stockage de C,

---

<sup>16</sup> Le modèle EPIC fut initialement développé dans les années 1980 aux Etats-Unis pour évaluer l'effet de l'érosion des sols sur la productivité de la terre (*Erosion-Productivity Impact Calculator*). Il fut ensuite étendu pour simuler l'effet de diverses pratiques sur la production agricole et les ressources naturelles, y compris au plan climatique. Fonctionnant à une échelle où le climat, le type de sol et les pratiques peuvent être considérés comme homogène (généralement parcelles ou exploitations ne dépassant pas 100 ha), il inclut divers modules : climat, hydrologie, érosion-sédimentation, cycle des nutriments, protection phytosanitaire, croissance des plantes, température du sol, labour, économie... Une version plus spécifique aux contextes européens a commencé d'être développée dans le cadre du projet européen INSEA (2004-06 ; cf. IASA, Autriche).

<sup>17</sup> Méthodes tier1 et/ou tier2 de l'IPCC (IPCC, 1996, 2001, 2003a, b), de Freibauer (Freibauer, 2003) ou encore de Klimont et Brink (Klimont et Brink, 2004) pour l'émission/stockage de GES ; indicateurs IDEA (Vilain, 2000), IFEN (Dormoy, 2003) ou autres pour le reste...

CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O en ce qui concerne le changement climatique)<sup>18</sup>. Cette évaluation sera a priori moins précise que celle permise par les modèles biophysiques développés pour tel ou tel pays ou continent, mais présentera l'avantage d'être plus rapide, plus universelle et aussi plus conforme aux méthodes actuellement utilisées pour des estimations faites aux échelles nationales (inventaires nationaux pour les GES). La plage d'incertitude entourant chaque résultat devra être précisée autant que possible.

#### (5) Interfaçage avec des modèles économiques

Enfin, l'ambition d'Agropol est de permettre à terme l'identification, pour une production, de conduites techniques particulièrement contrastées en termes de coûts et d'externalités, puis d'effectuer avec eux diverses simulations dans une région donnée, que cela soit à travers AGRIPOL (Cirad) ou des modèles économiques plus sophistiqués : IMACLIM-R (et NEXUS-LU), PRIMES, ou encore GEM-E3 (modèles multisectoriels en équilibre général), EU-FASOM (modèle sectoriel en équilibre partiel dynamique), AROPAJ (modèle sectoriel statiques), etc.

Les avantages de ce « modèle-ingénieur de coût » seraient donc au moins les suivants :

- transformer une information pouvant être très localisée (exploitation agricole) en matrices exploitables par des modèles travaillant à des échelles beaucoup plus agrégées ;
- comparer, par l'homogénéisation de divers paramètres (prix des facteurs, des produits et coproduits ; taux d'intérêt ou d'actualisation ; taux de conversion techniques...), l'intérêt productif (biomasse), économique (revenu), social (emploi) et environnemental (carbone, eau...) de diverses productions et de diverses techniques actuelles ou potentielles ;
- tester la sensibilité des marges agricoles à une augmentation du prix de l'énergie qui impacte les charges en facteurs fixes et variables (carburants et/ou électricité, engrais chimiques, pesticides, équipements...), et mesurer plus généralement le contenu en énergie fossile de très diverses produits agricoles ou forestiers ;
- confronter les résultats de bilans GES effectués avec des méthodes peu gourmandes en données avec ceux issus de modèles comme EPIC travaillant à l'échelle de la parcelle et de rotations pluriannuelles, ceci pour : (a) comparer des méthodes extrêmement différentes dans le volume d'informations mobilisées, (b) évaluer dans quelles mesures les bilans « simplifiés » peuvent être améliorés et standardisés pour dresser rapidement le bilan GES de productions au Nord ou au Sud.

Agropol serait donc à la fois plus limité et plus étendu que les matrices de coefficients techniques alimentant des modèles d'équilibre partiel comme OSCAR pour les biocarburants (Freire *et al.*, 2002, Rozakis et Sourie, 2005, Sourie et Rozakis, 2001, Sourie et Tréguer, 2005), ou encore que ces « générateurs de budget » (*Budget Generators*) plus ou moins sophistiqués qui se sont développés pour l'agriculture aux Etats-Unis<sup>19</sup> et plus rarement dans le reste du monde : SIMEQ en France par l'institut du végétal Arvalis, SILAS en Suisse par Malitius et Mack (J. Fischer, 1999), TECHNOGIN-3 pour l'Asie de l'Est et du Sud-est par Ponsioen *et al.* (2003)...

---

<sup>18</sup> L'exercice peut porter dans un premier temps sur les émissions classées par l'IPCC dans « Agriculture » et « Changement d'occupation des terres ». Mais il peut s'étendre dans un second temps aux émissions dites « indirectes » : émissions dues aux énergies fossiles consommées sur la ferme (engins mobiles, irrigation, séchage, réfrigération...), mais aussi émissions de CO<sub>2</sub> et d'autres GES pour la fabrication et la livraison d'intrants (engrais, pesticides, semences...), d'équipements, ou encore de bâtiments.

<sup>19</sup> CARE par Christensen *et al.* ; OKBUDS par Doye ; BUDPRO par Bevers, TRONSTAD par l'Université d'Arizona ; PLANETOR par Hawkins *et al.* ; MACHSEL par Kletke and Sestak, ABS par Slinsky et Tiller (Slinsky et Tiller, 1999)...

### 123. Le prototype

La version actuelle d'Agropol, développée sous le logiciel Access, est présentée en Annexe 1. Cette présentation détaillée des objectifs, écrans et fonctionnalités de l'interface est effectuée en langue anglaise, l'outil ayant pour ambition d'être utilisé à terme par de très divers fournisseurs de données, via ou non internet.

Dix écrans sont aujourd'hui opérationnels, avec de multiples listes de choix bilingues (unités, devises, types de sol, de climat, de matériel, d'engrais, etc.) destinées à accélérer et sécuriser une saisie correcte des informations jusqu'à l'estimation des coûts et marges économiques de cultures annuelles par unité de surface désirée. Les évaluations pour les productions pluriannuelles ne fonctionnent donc pas encore, de même que l'estimation instantanée des émissions-stockages de GES. Mais les informations nécessaires à ces exercices (ainsi qu'au calcul de divers autres indicateurs environnementaux) sont récoltées et compilées au fil des étapes précédentes, y compris celles conduisant à ré-estimer la teneur en carbone des sols après un éventuel changement d'occupation de la terre, où encore celles permettant d'estimer les émissions de CO<sub>2</sub> liées aux consommations d'électricité. On remarquera enfin que le prototype n'est pour l'instant pas équipé pour traiter le cas des cultures attelées : il pourra l'être à l'avenir après récupération et enregistrement des caractéristiques propres aux animaux et équipements utilisés dans ces cas, à l'instar des 220 matériels aujourd'hui proposés pour les cultures motorisées.

Le dernier écran fonctionnel (« *SimulCost* ») montre ainsi qu'il est aujourd'hui possible avec Agropol d'évaluer les divers coûts fixes et variables d'une culture motorisée, mais aussi de réévaluer instantanément ces coûts (et marges associées) après changement, par exemple, des taux d'intérêts, ou encore du prix des énergies directement utilisées dans le processus de production<sup>20</sup>. Il est également possible, et comme cela est illustré en Annexe 1 avec le blé tendre, de comparer aisément les résultats de pratiques ayant lieu dans divers endroits du monde, tout spécialement grâce aux efforts déployés pour permettre la saisie des informations et/ou l'expression des résultats dans les très diverses unités de mesure existantes (unités de surface, de volume, de distance, de puissance, de devises, etc.).

Le perfectionnement d'Agropol et l'extension de ses résultats aux indicateurs environnementaux (GES et autres) aurait pu se poursuivre si les perspectives d'obtention ultérieure de données primaires (description de pratiques culturales) ne s'avéraient pas largement dépasser le cadre et la durée de ce projet. Dans le simple cas des quelques cultures énergétiques françaises, il aurait fallu soit démarcher auprès des agriculteurs, soit négocier l'accès complet à des échantillons rares, confidentiels<sup>21</sup>, et n'offrant par ailleurs pas la totale assurance d'y trouver toutes les informations recherchées. Le développement d'Agropol a donc été interrompu mi-2006 au profit d'autres investigations. On dispose néanmoins et désormais d'une maquette relativement élaborée de modèle-ingénieur permettant de dresser ou simuler – partout dans le monde et relativement rapidement – des bilans éco-

---

<sup>20</sup> Pour les impacts indirects, notamment sur le prix d'intrants comme les engrais, des développements importants sont encore nécessaires.

<sup>21</sup> Données à l'échelle de la ferme de l'enquête de 2001 sur les pratiques culturales (SCESS, 2004) ; données d'enquêtes sur exploitation de l'Institut du Végétal Arvalis autres que celles relatives à ses fermes expérimentales de Boigneville dans le sud de l'Essonne, et de La Jaillièrre en Loire Atlantique (Arvalis, 2007) ; voire données européennes de l'enquête LUCAS phase II (interviews auprès des exploitations) quand Eurostat se sera décidé à diffuser de telles informations à la communauté scientifique (EU, 2003).

environnementaux de productions agricoles ou sylvicoles, outil faisant pour l'instant défaut et qu'il conviendrait pour cela de reprendre, perfectionner et utiliser largement pour satisfaire à terme un manque inquiétant d'informations dans le domaine.

## **2. Rétro-prospective des productions et usages mondiaux de biomasses alimentaires**

Le Conseil Général du Génie Rural, des Eaux et des Forêts (CGGREF) annonçait bien en 2006 la question centrale traitée dans le deuxième volet de ce rapport : « L'ère des combustibles fossiles' a permis l'explosion démographique de la planète (la population mondiale est passée de 1 milliard en 1800 à 6,5 milliards en 2005). Si la dérivée seconde de cette courbe a changé de signe, les projections actuelles prévoient 9 milliards d'individus en 2050, soit +40% en 50 ans. Avec l'élévation espérée du niveau de vie, et notamment celui des plus pauvres, les besoins alimentaires mondiaux sont susceptibles d'évoluer vers des régimes plus carnés donc plus consommateurs d'énergie et donc, à ration protéique égale, d'espaces cultivés, alors même que les terres disponibles pour l'agriculture ne devraient guère évoluer globalement, même si certaines extensions sont encore possibles. Ces tendances 'naturelles' de la demande alimentaire (x 4), jointes aux perspectives d'explosion des besoins énergétiques à partir de la biomasse, sont donc susceptibles de créer des déséquilibres croissants sur l'utilisation des terres, en totale inversion des tendances constatées sur les 20 dernières années, avec les excédents européens et la course à la conquête des marchés d'exportation. A tout le moins cela ne devrait pas constituer un facteur de détente dans la recherche permanente de productivité notamment sur les terres les plus fertiles, au contraire ! Ces tensions peuvent avoir autant d'effets positifs (revalorisation des prix et des revenus des agriculteurs sur tous les continents, redéploiement des aides publiques sur d'autres enjeux, capacité d'investissement dans la recherche...) que négatifs (accroissement des fractures sociales ou territoriales, impacts environnementaux...). Les questions de la disponibilité des ressources et de leur répartition sont donc posées pour le futur » (CGGREF, 2006).

Autrement dit, les potentialités ultimes des biocarburants ne peuvent être analysées indépendamment d'une prospective des besoins alimentaires en quantité comme en qualité (en particulier : transition vers des régimes plus intensifs en nutriments d'origine animale). Cette prospective nécessite par ailleurs d'être suffisamment spatialisée pour tenir compte des contraintes spécifiques à chaque région, dont celles imposées par l'équilibre des flux d'échange. Ces impératifs nous ont conduit à développer un outil spécifique, « Agribiom », auquel la suite de cet exposé est consacrée :

- un premier chapitre présente les objectifs et les composantes de cette plateforme quantitative conçue pour la rétro-prospective collective et la modélisation hybride des productions, échanges et usages globaux de biomasses ;
- le second chapitre utilise les données, grandeurs et estimations d'Agribiom pour procéder à une vaste rétrospective mondiale des productions, échanges et usages de biomasses alimentaires durant les quatre dernières décennies (1961-2003) ;
- enfin, dans un troisième chapitre, et à la lumière de la rétrospective précédente, sont présentés les résultats de simulations emplois-ressources de biomasses alimentaires effectuées avec Agribiom pour les deux scénarios de la prospective « Agrimonde : Agricultures et alimentations du monde en 2050 ». Comme énoncé dans l'introduction générale de ce rapport, cette prospective a été initiée par le Cirad et l'Inra en juin 2006. Elle a considérablement soutenu notre entreprise et débute en 2009 la diffusion de ses travaux et des nôtres (Agribiom) avec ce rapport et un autre (INRA et CIRAD, 2009) beaucoup plus développé qu'ici sur la construction, la justification et l'interprétation collectives des scénarios.

## **21. La plateforme Agribiom**

### *211. Objectifs de l'outil*

Agribiom est une plateforme quantitative développée pour (i) la retro-prospectivité collective et (ii) la modélisation hybride des productions, échanges et usages globaux de biomasses. Sa construction a débuté en 2006 au Cirad pour servir des exercices collectifs de prospective tels qu'Agrimonde, ainsi que des travaux de modélisation hybride objet de ce rapport.

L'équilibre physique (passé ou futur) entre emplois et ressources de biomasses alimentaires constitue, pour l'heure, le cœur et le moteur d'Agribiom. De tels équilibres peuvent désormais être reconstitués (des années 1960 à nos jours) ou simulés à diverses échelles géographiques (d'un pays à l'ensemble du monde) selon des unités de volume, des structures de bilan et des catégories de produits qui ont été imaginées pour :

(i) disposer d'un outil d'analyses rétrospectives et de simulations prospectives suffisamment simple, englobant, robuste et transparent pour interpeler et faire dialoguer une large variété d'expertises autour des questions de productions, d'échanges et de consommations de biomasses à l'échelle mondiale ;

(ii) fédérer et générer un ensemble de données permettant de développer des analyses et modélisations nouvelles, notamment dans des domaines et à des échelles où l'information statistique et la modélisation souffrent d'insuffisances (par exemple : conversion des biomasses végétales en biomasses animales aux échelles nationales) ;

(iii) caractériser des grands modes de production et consommation des biomasses alimentaires, et relier la spécificité de ces modes (observées ou simulées) à des données, modélisations ou débats relatifs à la sécurité alimentaire, à la pauvreté, aux demandes de produits agricoles non alimentaires (biocarburants, biomatériaux...), au développement et échanges économiques entre nations, aux prélèvements et prix de ressources minières ou naturelles, à l'émission/stockage de gaz à effet de serre, à la préservation des services rendus par les écosystèmes, etc.

Pour remplir ces fonctions, Agribiom est structuré en quatre chantiers :

(1) réunir, vérifier et relier, sur plusieurs décennies passées, des millions de données relatives aux productions, échanges et usages nationaux de produits agricoles et alimentaires ;

(2) élaborer, avec ces données de base, de nouvelles séries de données permettant des observations et modélisations nouvelles ;

(3) construire une interface permettant d'exposer à un public varié (chercheurs, experts, responsables politiques...) ces données et ces modèles, pour les discuter, puis simuler et débattre des scénarios d'équilibre emplois/ressources de biomasses alimentaires ;

(4) interagir avec d'autres travaux quantitatifs, notamment des modèles d'équilibre général calculable et des modèles biophysiques.

Les chapitres suivants s'attachent à décrire l'état d'avancement des trois premiers chantiers en fin d'année 2008 (voir § 3 de ce rapport pour l'état d'avancement du quatrième chantier). Evidemment, cet état ne fait pas apparaître des travaux qui n'ont pu être approfondis et finalisés, notamment dans les trois champs suivants :

(a) Les surfaces occupées par habitant (habitats, infrastructures, etc.) – L'accroissement à venir des populations va en effet empiéter plus encore sur les meilleures terres agricoles, et donc sur le niveau d'offre de biomasse alimentaire ou non-alimentaire. Or il existe très peu de

données sur la situation actuelle (hectares occupés par habitant), et ces dernières s'avèrent très divergentes d'un pays à l'autre : les facteurs expliquant ces très importantes variations ne sont pour l'instant pas identifiés.

(b) Les consommations directes et indirectes des agricultures en énergie fossile – L'augmentation passée des rendements agricoles, notamment en occident, est aussi largement basée sur une plus grande consommation d'énergie fossile, directement (motorisation, séchage ou réfrigération, etc.) et indirectement (engrais, pesticides, etc.). Les consommations directes sont très grossièrement renseignées dans quelques bases de données (Enerdata, IPCC...), mais les consommations indirectes, qui sont les plus importantes, restent à être évaluées. La solution ici envisagée est de reprendre des coefficients utilisés dans des écobilans de biocarburants (§ 1), et de les multiplier par des volumes de consommation d'intrants renseignés par FAOSTAT (engrais et pesticides au moins).

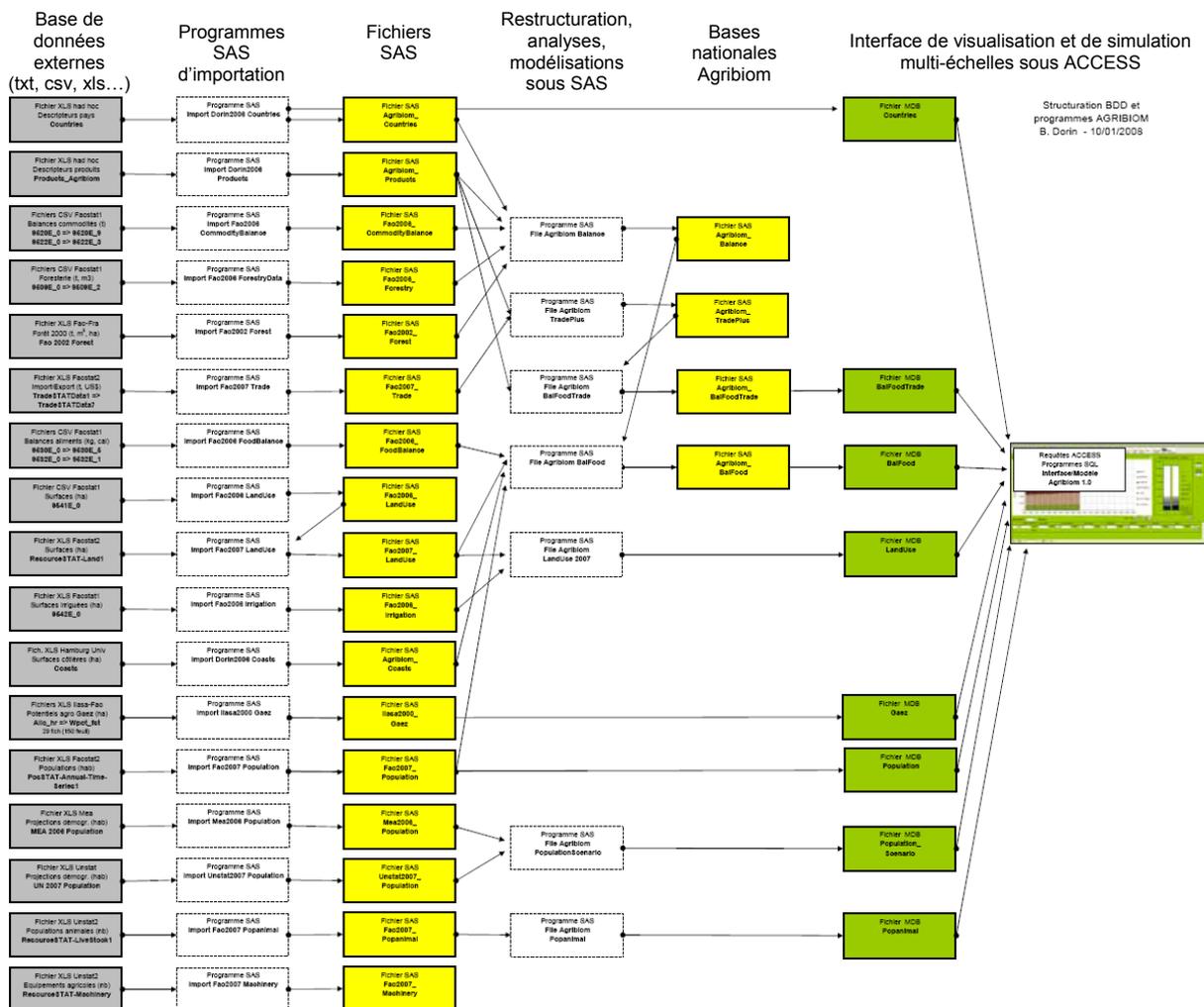
(c) Les consommations volumétriques en eau d'irrigation – L'accroissement de l'irrigation a contribué avec importance à l'accroissement de la productivité agricole observé ces dernières décennies, et ces consommations d'eau constituent déjà, où constitueront à l'avenir, un facteur très limitant pour poursuivre les tendances passées. Les données sur le sujet sont malheureusement quasi inexistantes (pas de série longue dans tous les cas), et les quelques modèles développés pour estimer ces volumes (Podium de IWMI, Impact-Water de l'IFPRI...) se restreignent quant à eux à quelques productions, ici où là dans le monde. Une solution aurait pu être d'estimer ces volumes à partir des volumes de production des cultures, mais le concept et les données d'« eau virtuelle » (Chapagain et Hoekstra, 2004a, b) s'avèrent insuffisantes sans disposer au préalable, dans chaque pays, des calendriers de chaque culture.

## 212. Organisation générale des traitements

Pour remplir les objectifs poursuivis en termes de rétrospectives historiques, de production de nouvelles séries statistiques, de modélisations, de simulations d'équilibres physiques emplois-ressources de biomasses, de communication avec divers expertises ou modèles, Agribiom s'alimente en amont d'un grand nombre de données historiques (plus de 30 millions de valeurs non redondantes courant 2008). La chaîne de traitement de cette masse d'informations est symbolisée en Figure 3. Elle mobilise les logiciels SAS® et Microsoft Access® pour permettre :

- une traçabilité des opérations et calculs mis en œuvre grâce à un agencement de programmes SAS entre des fichiers de données brutes aux structures et formats variables (xls, csv, txt...) et les bases et modèles élaborés pour l'exercice ;
- la convergence de ces bases et modèles vers une interface construite sous Access (système de gestion de base de données avec programmes SQL) pour visionner et exploiter ces derniers à de multiples échelles possibles de régionalisation du monde.

Figure 3. Structuration générale de traitement des données



Structuration BDD et programmes AGRIBIOM  
B. Dorin - 10/01/2009

### 213. Couvertures temporelle et géographique

Le service FAOSTAT des Nations-Unies regroupe, harmonise et diffuse un grand nombre de données nationales relatives à l'alimentation et à l'agriculture. L'importance de ce nombre est lié au souci de la FAO de couvrir l'ensemble des produits de l'agriculture utilisés par l'homme (et non uniquement ceux objets d'importantes transactions commerciales entre nations) ainsi que l'ensemble des pays (et non uniquement ceux dotés de moyens et compétences suffisamment élevés pour fournir des statistiques détaillées et de qualité). C'est à ces bases de données FAOSTAT que nous avons adossé l'essentiel de nos travaux, même si ces bases souffrent de défauts en grande partie liés au souci d'exhaustivité mentionné plus haut. On peut aisément souligner ces défauts. Pour notre part, à la plus grande fiabilité de certaines bases centrées sur des périodes, produits ou régions, nous avons préféré le « macroscopie » au « microscopie », c'est-à-dire tenter d'embrasser du regard – et via la même lunette – les divers espaces d'un vaste paysage (géographique et historique), plutôt que concentrer l'éclairage sur quelques parcelles de cet ensemble. Cette focale d'observation, d'analyse et de modélisation est complémentaire d'autres ; elle permet d'accéder à une connaissance à laquelle d'autres ne peuvent accéder, et vice-versa.

L'amélioration de la fiabilité et de la cohérence des données FAOSTAT ne demeure pas moins souhaitable, à côté de l'élargissement de ses données à des domaines pour lesquels il n'existe pas (ou plus...) de séries structurées et harmonisées à l'échelle internationale (facteurs de production agricole en particulier). En juin 2006 d'ailleurs, alors que débute la prospective Agrimonde, la FAO s'engage dans une vaste et ambitieuse réforme visant à améliorer, en particulier, ses Comptes Disponibilité-Utilisation (CDU) et les données qui concourent à élaborer ces derniers. Elle abandonne pour cela des séries remontant à 1961 (« Faostat1 »), et en propose début 2007 de nouvelles remontant à 1990 seulement (« Faostat2 »). Cette plus faible profondeur historique, couplée à d'autres motifs d'ordre plus technique (réorganisation des lignes de produits et de leur codage, du format des fichiers de base, du contenu des rubriques...), nous conduit à préférer utiliser les séries Faostat1 déjà rapatriées (FAO, 2006). Pour des raisons mal connues, Faostat2 est brutalement abandonné début 2008 pour un retour vers Faostat1. Ces tribulations expliquent qu'à la fin de la même année, les CDU et bilans alimentaires de la FAO (§ 217) ne soit pas actualisé au-delà de 2003, tout comme l'essentiel de nos séries.

Entre 1961 et 2003, la superficie terrestre n'a pas changé contrairement au nombre de pays ou à leurs frontières. Dans les séries FAOSTAT, on recense plus de 250 unités géographiques au cours de ces quatre décennies. Nous en avons retenus 149 (Annexe 2) après avoir écarté un grand nombre d'îles et micro-Etats très mal ou très irrégulièrement renseignés, et quelques autres zones plus vastes mais présentant les mêmes lacunes statistiques : Afghanistan, Antarctique, Guyane française, Irak, Sahara Occidental et Somalie)<sup>22</sup>. Cette sélection représente une superficie fixe entre 1961 et 2003 et, en 2000, par rapport au total « Monde » (hors Antarctique) de la FAO pour la même année :

- 98,3% des populations humaines (5 983,885 Mhab / 6 085,574)
- 98,6% des terres cultivés (cultures et plantations) (1 512,948 Mha / 1 534,945),
- 97,3% des surfaces terrestres (13 078,385 Mha / 13 443,345).

---

<sup>22</sup> La zone « Belgique-Luxembourg » a par contre été conservée alors qu'à compter de l'année 2000, les séries relatives aux bilans alimentaires ne comptaient aucune donnée pour cet ensemble ou pour l'une de ses unités (Belgique et Luxembourg séparés). Cela a introduit de petit biais dans diverses évaluations.

Notre total « Monde » sera donc calculé avec les entités ci-dessus précisées, entités dont le nombre varie selon l'année considérée : après 1991 par exemple, l'entité « URSS » se divise en 15 nouvelles (Fédération de Russie, Ukraine...). Il en ira de même pour les totaux régionaux de tel ou tel zonage du monde. Pour la prospective Agrimonde, le zonage utilisé est celui du MEA (*Millennium Ecosystem Assessment*) qui regroupe les pays (ou divise le monde...) en 6 régions (Figure 4). La répartition de nos entités dans les 6 régions du MEA est précisée en Annexe 2.

Ce zonage MEA délimite des régions jugées relativement homogènes, suivant quelques indicateurs choisis parmi la multitude en mesure de rendre compte de la diversité bien réelle des situations écologiques, socio-économiques ou encore historiques, ceci à partir d'unités géographiques d'analyse (pays en l'occurrence) ne portant pas en elles-mêmes la diversité des situations qu'elles intègrent. Ces regroupements d'espaces et ces changements d'échelle d'analyse sont aussi courants que nécessaires, même s'ils posent diverses questions, dans l'estimation de certaines grandeurs comme dans l'élaboration et l'application de modèles.

Figure 4. Carte des six régions du MEA

Source : d'après MEA (<http://www.millenniumassessment.org/documents/document.774.aspx.pdf>)



## 214. Populations humaines

Nos données historiques annuelles par pays relatives aux populations humaines sont extraites de la série « PopStat » de Faostat (fichier baptisé « *PopSTAT-Annual-Time-Series1* » en 2007-08). Cette série regroupe deux séries d'estimations de la Division Population des Nations-Unis : les « *Population-Estimates 2004 rev.* » et les « *Population-Estimates 2006 rev.* ». Nous avons retenu la première série parce qu'elle décrit les populations qu'elle recense suivant le sexe (populations féminine / masculine), la zone d'habitation (populations rurale / urbaine)<sup>23</sup>, le caractère agricole (populations agricole / non-agricole)<sup>24</sup>, le caractère « économiquement actif »<sup>25</sup>. La série « 2006 rev. » est bien moins développée mais plus à jour (année 2006 contre année 2005 pour « 2004 rev. »). Dans leur compte, ces deux séries diffèrent sensiblement en début (années 1960) comme en fin de période (années 2000). Pour 2005 par exemple, la population mondiale (agrégat « Monde+ » de la FAO) s'élève à 6,465 milliards d'individus avec la première série, à 6,515 avec la seconde (NB : pour 1961, on obtient successivement 3,081 et 2,804 milliards).

Pour les projections de populations humaines à l'horizon 2050, deux sources de données par pays sont mobilisées :

(1) les projections du MEA suivant ses 4 scénarios (AM, GO, OS, TG), de 2000 à 2050 par tranche de 5 ans, suivant 21 classes d'âge (0-4 ans, 5-9 ans, etc.) ;

(2) les projections des Nations Unies telles que mises en ligne courant 2007 sur le site UNSTATS<sup>26</sup>, par année de 2006 à 2050, suivant 4 hypothèses : fertilité constante (« *Constant fertility scenario* ») et variantes haute (« *High variant projection* »), basse (« *Low variant projection* ») et intermédiaire (« *Medium variant projection* ») de projection.

Notre espace géographique d'étude étant plus réduit que la réalité pour les raisons exposées au chapitre précédent, et conservé constant en rétrospectif comme en prospectif pour assurer

---

<sup>23</sup> Glossaire Faostat en ligne (2008) : « Population rurale » = « Reste de la soustraction de la population urbaine du total de la population » et « Population urbaine » = « *Usually the urban areas and hence the urban population are defined according to national census definitions which can be roughly divided into three major groups: classification of localities of a certain size as urban; classification of administrative centres of minor civil divisions as urban; and classification of centres of minor civil divisions on a chosen criterion which may include type of local government, number of inhabitants or proportion of population engaged in agriculture, as urban.* »

<sup>24</sup> Glossaire Faostat en ligne (2008) : « Ensemble des personnes qui vivent de l'agriculture, de la chasse, de la pêche ou de la foresterie. Cette estimation comprend toutes les personnes exerçant une activité agricole ainsi que les inactifs à leur charge. Il ne s'agit pas nécessairement d'une population issue exclusivement de la population rurale ».

<sup>25</sup> Deux définitions dans la version française du glossaire Faostat en ligne (2008) :

- « Ensemble des personnes employées (y compris les personnes ayant dépassé un certain âge et qui, au cours de la période de référence occupaient un emploi rémunéré, avaient un travail, étaient travailleurs indépendants ou avaient en emploi mais ne travaillaient pas) et les personnes sans-emploi (y compris les personnes ayant dépassé un certain âge et qui, au cours de la période de référence, n'avaient pas d'emploi, étaient disponibles pour travailler et cherchaient du travail) »

- « Ensemble des personnes occupées ou non (y.c. celles qui recherchent du travail pour la première fois). Il recouvre les employeurs, les travailleurs indépendants, les employés salariés, les ouvriers salariés, les travailleurs non rétribués qui aident une famille ou travaillent dans une ferme ou un commerce, les membres des coopératives de producteurs, et les membres des forces armées. La population active est également appelée main-d'œuvre ».

<sup>26</sup> Série « Population total (UN Pop. Div. annual estimates and projections) [code 13660] » téléchargée le 08/05/2007 à l'adresse [http://unstats.un.org/unsd/cdb/cdb\\_advanced\\_data\\_extract.asp?srID=13660](http://unstats.un.org/unsd/cdb/cdb_advanced_data_extract.asp?srID=13660)

la cohérence des calculs et autoriser des comparaisons sans biais dans le temps, ceci conduit à des écarts d'estimations avec d'autres sources que le Tableau 5 précise.

Tableau 5. Variations d'estimation des populations humaines mondiales (2000 et 2050)

Année	Source	(millions d'habitants)	Total pays Source	Total pays Agribiom	Ecart	
2000	FAOSTAT	Estimations 2006 Rev.	6 124	5 984	140	2,3%
2000	FAOSTAT	Estimations 2004 Rev.	6 086	5 984	102	1,7%
2000	UNSTAT, 2007	Code 13660	6 086	5 984	102	1,7%
2050	MEA, 2006	Scénario GO	8 085	7 872	213	2,6%
2050	MEA, 2006	Scénario TG	8 812	8 578	234	2,7%
2050	MEA, 2006	Scénario AM	9 514	9 265	250	2,6%
2050	MEA, 2006	Scénario OS	9 559	9 303	256	2,7%
2050	UNSTAT, 2007	Scénario "Variante basse"	7 667	7 440	227	3,0%
2050	UNSTAT, 2007	Scénario "Variante intermédiaire"	9 060	8 800	260	2,9%
2050	UNSTAT, 2007	Scénario "Variante haute"	10 627	10 330	297	2,8%
2050	UNSTAT, 2007	Scénario "Fertilité constante"	11 634	11 245	389	3,3%

### 215. Utilisation des terres

Les données historiques annuelles par pays relatives à l'utilisation générale des terres combinent trois séries de données Faostat :

- [1] la série « Terres » (« *Land* ») dans son état de 2007 (fichier « *RessourceSTAT-Land1.xls* ») ;
- [2] la série « Terres » (« *Land* ») dans son état de 2006 (fichier « *9541E\_0.csv* ») ;
- [3] la série « Surfaces irriguées » dans son état de 2006 (fichier « *9542E\_0.csv* »).

La série [1] actualise jusqu'en 2005 des données FAO sur l'usage des sols qui distinguent 6 catégories :

- les cultures annuelles (dénommées « Terres arables », « *Arable land* »)<sup>27</sup>,
- les plantations (« Cultures permanentes », « *Permanent crops* »)<sup>28</sup>,
- les pâtures (« Prairies et pâturages permanents », « *Permanent meadows and pastures* »)<sup>29</sup>,
- les forêts (« Forêts », « *Forests* »)<sup>30</sup>,
- les autres terres émergées (« Autres terres », « *Other land* »),
- les lacs, rivières et autres terres immergées (« Eaux intérieures », « *Inland water* »),

le total de ces surfaces devant en principe évaluer la « superficie totale du pays » (Tableau 6) par ailleurs renseignée (avec d'autres agrégats intermédiaires de type « Surfaces agricoles »).

<sup>27</sup> Glossaire Faostat en ligne (2008) : « Les terres arables sont les terres affectées aux cultures temporaires (les superficies récoltées deux fois n'étant comptées qu'une fois), prairies temporaires à faucher ou à pâturer, jardins maraîchers ou potagers et terres en jachères temporaires (moins de cinq ans). Les terres abandonnées à la suite de cultures itinérantes ne figurent pas dans cette catégorie. Les données relatives aux terres arables n'ont pas pour objet d'indiquer la quantité des terres potentiellement arables ».

<sup>28</sup> Glossaire Faostat en ligne (2008) : « Les cultures permanentes sont semées ou plantées une fois, puis occupent le terrain pendant quelques années et ne doivent pas être replantées après chaque récolte annuelle, comme le cacao, le café et le caoutchouc. Cette catégorie comprend les arbustes destinés à la production de fleurs, les arbres fruitiers et les vignes, mais non les arbres destinés à la production de bois ou de grumes ».

<sup>29</sup> Glossaire Faostat en ligne (2008) : « Terres consacrées de façon permanente (cinq ans au minimum) aux herbacées fourragères, cultivées ou sauvages (prairies sauvages ou pâturages). La limite entre cette catégorie et la catégorie "Forêts et terrains boisés" n'est pas très nette, en particulier pour les zones arbustives, la savane, etc., qui peuvent avoir été prises en compte dans une catégorie ou dans l'autre ».

<sup>30</sup> Glossaire Faostat en ligne (2008) pour « Forêts et terres boisées » : « Toute terre portant des peuplements naturels ou artificiels d'arbres, qu'ils soient productifs ou non. Cette catégorie comprend les terres déboisées dont le reboisement est envisagé dans un proche avenir mais non les forêts ou les terres boisées réservées aux loisirs. La question des zones arbustives, de la savane, etc., pose le même problème que dans la catégorie "Prairies et pâturages permanents" ».

La diffusion de cette série [1] est l'occasion pour la Faostat d'ajouter de nouvelles et importantes rubriques (« Jachères », « Prés et pâturages temporaires »...). Mais celles-ci s'avèrent exceptionnellement renseignées, ou insuffisamment actualisées jusqu'en 2005 pour les surfaces irriguées : ces dernières ont été importées de l'ancienne série [3] couvrant la période 1961-2003. La série [1] propose également de nouvelles estimations pour les surfaces en forêts, sans néanmoins remonter au-delà de 1990 : avant cette date, les données de la série [2] ont été importées, et la surface « Autres terres émergées » ajustée de manière à ce que la somme des utilisations ne dépasse pas la superficie totale du pays. Enfin, cette série [1] ne corrige pas certaines lacunes, erreurs et inconsistances constatées les années précédentes dans cette série sur l'usage des terres<sup>31</sup> : quelques corrections ont été apportées.

Dans la suite des travaux, les surfaces de cultures annuelles et pérennes (plantations) ont été fondues en une seule catégorie, les « surfaces cultivées », surfaces au sein desquelles nous distinguons, pour les simulations, de possibles importantes « surfaces cultivées non-alimentaires » (SCNA : caoutchouc, tabac, fibres, eucalyptus, ...) à côté des « surfaces cultivées alimentaires » (SCA). Nous avons considéré ces SCNA comme nulles jusqu'au début des années 2000 bien qu'elles ne le soient pas<sup>32</sup>, pour une raison principale, et plus générale : nous nous sommes résolus à ne pas utiliser les « surfaces récoltées » par culture telles que renseignées dans les séries FAO « ProdSTAT » parce que leur rapprochement avec les surfaces nettes cultivées de la série [1] s'avère complexe et fournir, avec nos tentatives, des résultats trop fréquemment étonnants ou incohérents.

Enfin, les données nationales annuelles relatives aux côtes et surfaces maritimes (années 1990 à 2000 selon les cas) ont été importées d'une base élaborée par l'Université de Hambourg. Cette base un temps disponible sur le site de l'Université ([www.fnu.zmaw.de](http://www.fnu.zmaw.de)) compilait des données de diverses origines (*World Resources Institute, CIA World Fact Book, Delft Hydraulics, Gallup and Sachs...*) dont « *The Global Maritime Boundaries Database (GMBD)* » pour les surfaces en plateau continental.

Tableau 6. Variations d'estimation de surfaces terrestres mondiales (2003)

Surfaces (x 1000 ha)	Total pays	Total pays	Ecart	
	Faostat (Word+)	Agribiom	(ha)	(%)
(1) Cultures et plantations	1 551 518	1 529 043	22 475	1,4%
- Cultures annuelles ( <i>arable land</i> )	1 413 002	1 392 951	20 052	1,4%
- Plantations ( <i>permanent crops</i> )	138 516	136 093	2 423	1,7%
- Superficie irriguée ( <i>total area equipped for irrigation</i> )	276 500	270 273	6 227	2,3%
(2) Pâtures ( <i>permanent meadows and pastures</i> )	3 415 704	3 325 988	89 716	2,6%
(3) Forêts ( <i>forest area</i> )	3 966 660	3 904 776	61 883	1,6%
(4) Autres terres émergées ( <i>other land</i> )	4 078 908	3 891 722	187 186	4,6%
(5) Eaux intérieures ( <i>inland water</i> )	429 780	426 910	2 870	0,7%
Total (1) + (2) + (3) + (4)	13 012 789	12 651 530	361 260	2,8%
Superficie émergée ( <i>land area</i> )	13 013 621	12 651 530	362 091	2,8%
Total (1) + (2) + (3) + (4) + (5)	13 442 569	13 078 440	364 130	4,6%
Superficie totale ( <i>country area</i> )	13 443 401	13 078 440	364 961	2,7%

<sup>31</sup> la superficie de l'Espagne diminue puis augmente entre 1990 et 2003, la superficie du Groenland augmente de 6,9 millions d'hectares entre 1996 et 1997...

<sup>32</sup> En 2003, selon la FAO, à l'échelle mondiale (Word+), les surfaces récoltées (brutes) en fibres, caoutchouc et tabac totalisaient un peu plus de 46 millions d'hectares, soit 3% de la surface cultivée nette (1 552 Mha)

## 216. Potentiels cultivables

A la fin des années 1990, l'ambition de la FAO et de l'IIASA, via Fischer *et al.* (2001, 2000, 2002), est de procéder à une nouvelle évaluation des potentiels mondiaux de production agricole en valorisant des avancées récentes en images satellitaires et techniques SIG (systèmes d'information géographique). Cette démarche, baptisée GAEZ (*Global Agro-Ecological Zones*), s'appuie sur les AEZ (*Agro-Ecological Zones*) qui, objets de travaux divers depuis 20 ans, s'efforcent d'identifier et caractériser les zones de climats, de sols et de terrains plus ou moins propices aux productions agricoles.

La méthode GAEZ consiste, *grosso modo*, à adapter puis croiser, sur les cellules d'une grille géographique beaucoup plus fine que l'échelle nationale (i.e. des « carrés » de quelques kilomètres de côté), les deux types de données ci-après.

### (a) Données sur les milieux agro-écologiques

Ces données portent sur :

- le climat (données/modèle CRU à 30 minutes<sup>33</sup> de latitude/longitude, avec moyenne 1961-90 pour le climat dit « de référence », et données IPCC pour les scénarios climatiques) ;
- le type de sol (base de données Fao/Unesco DSMW sur 2,2 millions de cellules de 5 minutes de latitude/longitude) ;
- la pente (modèle numérique d'élévation GTOPO30 à 30 arc-seconde de latitude/longitude) ;
- l'occupation « actuelle » des terres (12 type « agrégés » d'occupation issus de la cartographie GLCC à 30 arc-seconde de latitude/longitude effectuées à partir d'images satellites prises, semble-t-il, en 1992/93).

### (b) Données sur de possibles utilisations des terres

462 types d'utilisation des terres – ou LUTs (*Land Utilization Types*) – sont retenus (puis caractérisés)<sup>34</sup> en combinant :

- 154 productions agricoles incluant quelques fourrages et pâtures, ou plutôt 27 espèces déclinées en divers sous-types attachés à une zone climatique : 8 céréales (83 ST : 4 blés hibernants, 12 blés non-hibernants, 13 maïs grain et 6 maïs ensilage, etc.), 3 racines ou tubercules (8 ST : 4 pommes de terres, 1 manioc, 3 patates douces), 3 pois et lentilles (17 ST), 6 oléagineux (25 ST, dont 1 palmier et 1 olivier), 1 fibre (7 ST de coton), 2 cultures sucrières (6 ST : 1 canne à sucre et 5 betteraves sucrières), 1 fruit (banane/plantain) et 3 fourrages (5 ST : 1 luzerne, 4 pâtures de graminées, 4 pâtures de légumineuses) ;
- 3 niveaux d'intensification (d'intrants), successivement baptisés « bas » (agriculture de subsistance : pas d'utilisation d'engrais chimiques, de pesticides ou de semences améliorées), « intermédiaire » (utilisation de certains intrants « modernes » et mécanisation partielle) et « haut » (type « agriculture commerciale d'Europe de l'Ouest ou d'Amérique du Nord »).

Le croisement de ces 2 ensembles de données conduit, au niveau de chaque cellule de la grille géographique considérée, à d'abord calculer un rendement potentiel (de biomasse et de

---

<sup>33</sup> 1 degré (60 minutes) à l'Équateur équivaut environ à 111 km ; 30 arc-seconde = 1 minute = 1,854 km à l'Équateur

<sup>34</sup> Chaque LUT est référencé sur divers critères : type de plante (C3, C4...), durée du cycle de production, période de pré-dormance et post-dormance, indice foliaire maximum, rendement potentiel, étapes critiques de croissance / besoins minimum en eau, facteurs de limitation des rendements, indice de récolte, taux d'extraction, contenu nutritionnel, taux d'utilisation des coproduits et résidus, etc.

produit récolté) sans autre contrainte que la température et le rayonnement solaire, puis à réviser ce rendement en fonction, successivement :

- des contraintes dites « agro-climatiques » (précipitations, essentiellement), ce qui conduit alors à distinguer les cultures pluviales (*rainfed*) des cultures irriguées (sans présumer des réelles disponibilités en eau et de la qualité de cette dernière) ;
- des contraintes dites « de sol et de terrain », incluant notamment la pente (qui limite l'intensification des productions par mécanisation, irrigation...) et les besoins en jachères (pour assurer une fertilité à long terme des sols dans le milieu considéré), ce qui conduit alors à distinguer les potentiels suivant les 3 niveaux d'intensification mentionnés plus haut (bas, intermédiaire et haut).

L'ensemble conduit ainsi à évaluer en terme de surface, par culture (blé, riz, etc. + quelques catégories agrégées, dont « cultures céréalières » et « toutes les cultures »), par niveau d'intensification (bas, intermédiaire et haut), et par utilisation ou non d'irrigation (du moins pour les niveaux d'intrants intermédiaire et haut), quatre gradients de potentiels : VS (*very suitable*), S (*suitable*), MS (*moderately suitable*) et mS (*marginally suitable*), ceci à côté de NS (*not suitable land*) et de NAG (*land estimated for settlement and infrastructure*). L'exercice conduit également à fournir des rendements potentiels maximum pour chaque classe issue des combinaisons ci-dessus évoquées.

Toutes les données GAEZ exprimées par pays et disponibles en ligne (FAO et IIASA, 2000) ont été importées, et celles utilisées par la prospective Agrimonde (après agrégation par région MEA) sont présentées en Annexe 7. L'examen de ces données conduit à relever des problèmes ou difficultés qui permettent de cerner des limites d'utilisation :

- (a) l'interprétation des agrégats « *All crops* » et « *Mixed inputs* » n'a pas été aisée en raison de définitions floues ;
- (b) les résultats de potentiels présentés dans les 3 sources (FAO et IIASA, 2000, G. Fischer *et al.*, 2000, G. Fischer *et al.*, 2002) ne sont pas identiques<sup>35</sup> ;
- (c) les superficies de pays selon GAEZ sont sensiblement égales à celle de la FAO (§ 215), mais il existe des exceptions<sup>36</sup> qui ne peuvent être expliquées par les surfaces terrestres immergées ;
- (d) les surfaces en forêts et les surfaces artificialisées (habitats, routes, etc.) sont évaluées pour une année qui reste imprécisée (1992/93 ?) ;
- (e) les potentiels GAEZ ne sont pas exprimés par catégorie actuelle d'utilisation des terres, si ce n'est pour les forêts dont les surfaces totales s'avèrent très différentes (en général très inférieures) de celles de FAOSTAT et, plus généralement, d'autres sources de données sur l'occupation des terres durant les années 1990 ;
- (f) une estimation similaire des potentiels cultivables aurait été effectuée après simulation d'un réchauffement (uniforme...) plus ou moins important de la planète (+1°C, +2°C, etc.), mais ces données se sont avérées inaccessibles.

---

<sup>35</sup> Exemple : pour le potentiel VS+S+MS en condition pluviale avec un niveau mixte d'intensification, on trouve successivement, pour l'Amérique du Nord, 384,2 Mha avec les données en ligne, 405,5 Mha dans le rapport 2000, et 366,3 Mha dans le rapport 2002.

<sup>36</sup> Bhutan (14% de différence), Suriname, Liberia, Morocco, Ecuador, Belgium-Luxembourg, Saudi Arabia, United Arab Emirates, Libyan Arab, Netherlands, Kuwait, India, Rwanda, Niger, Guinea-Bissau, Tunisia (6%)...

## 217. Bilans ressources-emplois de biomasses alimentaires

Comme énoncé en introduction de cette section sur Agribiom, l'équilibre physique (passé ou simulé) d'emplois et ressources de biomasses constitue le cœur de nos travaux, avec la spécificité d'associer pour l'heure trois particularités.

La première particularité de nos bilans ressources-emplois est qu'ils sont élaborés pour la quasi-totalité des « biomasses alimentaires » que nous avons réparties en 5 « compartiments » liés à l'origine des produits et à l'usage des sols :

- les produits végétaux (*VEGE*),
- les produits animaux, avec ceux de ruminants et gros herbivores d'une part (*RUMI*), ceux de monogastriques d'autre part (*MONO*),
- les produits aquatiques (végétaux ou animaux), avec les produits d'eaux douces d'un côté (*AQUA*) et les produits d'eaux marines de l'autre (*MARI*).

Par « biomasse alimentaire », nous entendons toute matière organique pouvant, sous sa forme primaire, servir d'aliment à l'être humain, et servant effectivement à cet usage sous une forme plus ou moins élaborée (graines, huile, pain, cornflakes, etc.), ou bien étant orientée totalement (ex. graines de maïs) ou partiellement (ex. tourteaux) vers l'alimentation animale ou d'autres utilisations (semences, éthanol ou biodiesel, chimie verte...). Cette définition intègre donc un très grand nombre de produits agricoles, mais pas tous puisque sont ici exclus des produits comme le caoutchouc, les fibres de coton ou autre, la soie, la laine, le cuir, les huiles essentielles, les fourrages (luzernes, ensilages, pailles, bagasses...), etc.<sup>37</sup>.

La deuxième particularité de notre comptabilité est d'utiliser la calorie alimentaire (kcal) comme unité commune de volume physique, pour les consommations comme pour les productions ou échanges de biomasses. Toute biomasse alimentaire fournit en effet de l'énergie à l'être humain, énergie qui, par gramme ou kilogramme de produit ingéré, est particulièrement élevée avec les huiles et graisses végétales ou animales, et particulièrement basse avec des produits frais comme les agrumes, tomates, mollusques et crustacés, ou des produits tropicaux comme le thé, café ou ananas. L'utilisation de cette unité permet, en particulier, d'additionner (et regrouper en « compartiments »...) des quantités de produits qu'il est inapproprié d'additionner quand ces dernières sont exprimées en tonnes, litres ou effectifs. Cependant, si l'analyse en calories alimentaires présente divers intérêts, elle comporte également des limites, notamment aux plans économique (la calorie d'un grain de maïs ne vaut pas celle d'une graine de café...) et nutritionnel (Deaton et Dreze, 2009, Dorin, 1999). Sur ce dernier point, on soulignera qu'un régime satisfaisant en calories ne l'est pas nécessairement en micronutriments (vitamines et minéraux, particulièrement présents dans les fruits et légumes), ni même en macronutriments (glucides, protéines et lipides) dont les diverses formes doivent chacune être consommées sans déficit ni excès pour mener une vie saine et active. Ces considérations et d'autres nous ont conduit à exprimer autant que possible les bilans caloriques suivant leur teneur en glucides, protéines et lipides, sur la base d'un apport moyen de, respectivement, 4, 4 et 9 kcal par gramme de macronutriment.

---

<sup>37</sup> Nos bilans alimentaires n'intègrent également pas les animaux vifs (dont le commerce et les variations de stocks, en particulier, ne sont pas sans influence sur les bilans alimentaires), une raison étant que seuls leurs produits (lait, viande...) sont objet de CDU (cf. infra).

La troisième particularité est de représenter puis simuler les ressources et emplois annuels de biomasses alimentaires selon la structure d'équation présentée ci-après, équation que l'on veut vérifier :

- au niveau de chaque compartiment  $i$  de biomasse (VEGE, RUMI...)
- à l'échelle de chaque région  $r$  considérée (ex : régions du MEA)
- de manière à ce que la somme des soldes  $TRAD$  (Exports-Imports) par compartiment  $i$  soit nulle à l'échelle mondiale :

$$AREA^{r,i} * (PROD^{r,i} / AREA^{r,i}) - TRAD^{r,i} + \Delta STOC^{r,i} \\ = POPU^r * (FOOD^{r,i} / POPU^r) + FEED^{r,i} + SEED^{r,i} + VANA^{r,i} + WAST^{r,i}$$

avec :

- $i$  un compartiment de biomasse alimentaire (VEGE, RUMI, MONO, AQUA ou MARI)
- $r$  une région du monde (pays ou groupe de pays)
- $AREA^{r,i}$  une surface (ha) dans une région  $r$  : surface cultivée alimentaire (SCA)<sup>38</sup> quand  $i = VEGE$ , surface recouverte en eaux douces quand  $i = AQUA$ , surface de plateau continental quand  $i = MARI$  ; sinon ( $i = RUMI, MONO$ ) :  $AREA = 1$
- $PROD^{r,i}$  un volume de production alimentaire  $i$  dans une région  $r$  (kcal)
- $PROD^{r,i} / AREA^{r,i}$  un rendement en produits alimentaires  $i$  (kcal/ha) dans une région  $r$  quand  $i = (VEGE, AQUA, MARI)$  ; sinon ( $i = RUMI, MONO$ ),  $PROD^{r,i} / AREA^{r,i} = PROD^{r,i}$
- $TRAD^{r,i}$  un solde Exports-Imports (kcal) en produits alimentaires  $i$  pour la région  $r$
- $\Delta STOC^{r,i}$  une variation de stocks (kcal) de produits  $i$  dans la région  $r$  (signe négatif si déstockage)
- $POPU^r$  un effectif de populations humaines (personnes) dans une région  $r$
- $FOOD^{r,i}$  un volume de produits alimentaires  $i$  (kcal) utilisé dans une région  $r$  pour l'alimentation des populations humaines, y compris gaspillages et pertes durant et après la mise à disposition aux ménages et collectivités
- $FOOD^{r,i} / POPU^r$  un niveau moyen de consommation par personne (kcal/tête) de produits  $i$  dans la région  $r$  (y compris gaspillages et pertes...)
- $FEED^{r,i}$  un volume de produits alimentaires  $i$  (kcal) utilisé dans la région  $r$  pour l'alimentation des animaux
- $SEED^{r,i}$  un volume de produits alimentaires  $i$  (kcal) utilisé dans la région  $r$  pour la reproduction
- $VANA^{r,i}$  un volume de produits alimentaires  $i$  (kcal) utilisé dans la région  $r$  à des fins non-alimentaires : lubrifiants, énergie, cosmétique, biomatériaux...
- $WAST^{r,i}$  un volume de pertes de produits alimentaires  $i$  (kcal) dans la région  $r$  entre le disponible (Production +/- Exports-Imports +/- Stocks) et la mise à disposition effective à tel ou tel usage.

Les volumes de biomasses sont exprimés en calories alimentaires, qui peuvent être des calories totales, mais aussi des calories issues uniquement des glucides, des protéines, ou encore des lipides. Le terme de gauche de l'équation représente les ressources : les productions régionales de biomasses augmentées ou diminuées du solde net des exports-imports et des variations nettes de stocks. Pour les biomasses végétales et aquatiques, les productions régionales sont représentées comme fonction d'espaces de production plus ou moins vastes (ha) et de productivité (partielle) de ces espaces plus ou moins importantes (kcal/ha)<sup>39</sup>. Une telle représentation n'étant pas possible pour les productions de biomasses animales (RUMI et MONO)<sup>40</sup>, il a fallu, pour la simulation de telles productions, recourir à d'autres formes (§ 219). Le terme de droite de l'équation représente quant à lui les usages régionaux des biomasses. Il représente les consommations alimentaires humaines comme des populations humaines plus ou moins nombreuses (personnes) disposant de quantités plus ou moins importantes de biomasses par personne (kcal/personne).

<sup>38</sup> Cf. § 213 : surface cultivée totale (cultures annuelles et plantations) – surface cultivée non-alimentaire (SCNA : caoutchouc, eucalyptus, biomatériaux)

<sup>39</sup> Cette représentation de la production est aussi simple que réductrice et orientée vers l'investigation de questions plutôt que d'autres ; ces dernières ne sont pas par exemple pas ici relatives au nombre d'actifs agricoles, et à la productivité (partielle) du travail de ces actifs.

<sup>40</sup> La production de ces biomasses peut difficilement être reliée à des quantités spécifiques d'hectares

Cette représentation des ressources et emplois de biomasses alimentaires est étroitement liée aux séries statistiques qui pouvaient raisonnablement la renseigner sur le passé à l'échelle de chaque pays du monde, et sur une période relativement longue. Les séries mobilisées pour les populations humaines (*POP*) et les surfaces (*AREA*) ont déjà été présentées (§ 214, 215). Les autres sont issues d'une base de données beaucoup plus volumineuse que les précédentes, base qui reprend et compacte elle-même des séries détaillées de productions et d'échanges de produits agricoles. Cette base est celle des Comptes Disponibilité Utilisation (CDU, « *Commodity Balances* ») élaborés par la FAO (FAO, 2006). Les CDU présentent le grand intérêt d'être établis (i) pour la quasi-totalité des pays du monde, (ii) sur plus de quarante ans (1961-2003), (iii) pour plus de 120 lignes de produits, (iv) de manière que, pour chacune de ces lignes, l'évaluation des « disponibilités » nationales (production + importation – exportation – variation de stock) équilibrent des « utilisations ». Ces dernières comptent 6 rubriques : les cinq mentionnées ci-dessus (*FOOD*<sup>41</sup>, *FEED*<sup>42</sup>, *SEED*<sup>43</sup>, *VANA*<sup>44</sup>, *WAST*<sup>45</sup>) et une sixième intitulée « Manufacturé » (cf. infra).

Cette comptabilité annuelle par pays est effectuée en tonnes. Pour les 109 lignes de ce que nous considérons comme « biomasses alimentaires » (Annexe 3), ces tonnages ont été convertis en calories totales et en calories issues des macronutriments (glucides, protéines, lipides) à partir de références FAO (2003), parfois de références USDA (2006), et de l'équation  $Kcal_{Total} = 4 * g_{glucides} + 4 * g_{protéines} + 9 * g_{lipides}$ . Dans le cas particulier des aliments pour animaux (ex. tourteau de soja), des équivalents caloriques et macro-nutritionnels ont été déduits des valeurs caloriques et macro-nutritionnelles du produit primaire (ex. graine de soja), des valeurs caloriques et macro-nutritionnelles d'un produit secondaire (ex. huile de

<sup>41</sup> Glossaire Faostat en ligne (2008) : *Data refer to the total amount of the commodity available as human food during the reference period. Data include the commodity in question, as well as any commodity derived therefrom as a result of further processing. Food from maize, for example, comprises the amount of maize, maize meal and any other products derived therefrom available for human consumption. Food from milk relates to the amounts of milk as such, as well as the fresh milk equivalent of dairy products.*

<sup>42</sup> Glossaire Faostat en ligne (2008) : *Data refer to the quantity of the commodity in question available for feeding to the livestock and poultry during the reference period, whether domestically produced or imported.*

<sup>43</sup> Glossaire Faostat en ligne (2008) : *Data include the amounts of the commodity in question set aside for sowing or planting (or generally for reproduction purposes, e.g. sugar cane planted, potatoes for seed, eggs for hatching and fish for bait, whether domestically produced or imported) during the reference period. Account is taken of double or successive sowing or planting whenever it occurs. The data of seed include also, when it is the case, the quantities necessary for sowing or planting the area relating to crops harvested green for fodder or for food.(e.g. green peas, green beans, maize for forage) Data for seed element are stored in tonnes (t). Whenever official data were not available, seed figures have been estimated either as a percentage of supply (e.g. eggs for hatching) or by multiplying a seed rate with the area under the crop of the subsequent year.*

<sup>44</sup> Glossaire Faostat en ligne (2008) : *Data refer to quantities of commodities used for non-food purposes, e.g. oil for soap. In order not to distort the picture of the national food pattern quantities of the commodity in question consumed mainly by tourists are included here (see also "Per capita supply"). In addition, this variable covers pet food.*

<sup>45</sup> Glossaire Faostat en ligne (2008) : *Amount of the commodity in question lost through wastage (waste) during the year at all stages between the level at which production is recorded and the household, i.e. storage and transportation. Losses occurring before and during harvest are excluded. Waste from both edible and inedible parts of the commodity occurring in the household is also excluded. Quantities lost during the transformation of primary commodities into processed products are taken into account in the assessment of respective extraction/conversion rates. Distribution wastes tend to be considerable in countries with hot humid climate, difficult transportation and inadequate storage or processing facilities. This applies to the more perishable foodstuffs, and especially to those which have to be transported or stored for a long time in a tropical climate. Waste is often estimated as a fixed percentage of availability, the latter being defined as production plus imports plus stock withdrawals.*

soja) et d'un taux d'extraction constaté pour ce dernier en moyenne mondiale, ceci à partir des tonnages CDU de la FAO sur toute la période considérée (ex. 18% pour l'huile de soja). Une fois ces conversions en calories effectuées, les lignes sont agrégées en compartiments comme indiqué en Annexe 3, en devant parfois procéder à des arbitrages parfois contestables<sup>46</sup>.

Les CDU offrent une source unique d'information pour évaluer et analyser de grandes tendances en matière de productions, échanges et usages de biomasses. Mais cette comptabilité est imparfaite et complexe. Elle nous a conduit, en particulier, à formuler et tester diverses options de classement des lignes en produits « primaires » ou « secondaires », ceci afin d'éviter des doubles comptages (notamment en matière de production) et obtenir *in fine* des bilans Ressources-Emplois relativement équilibrés à l'échelle globale tant en termes de calories totales que de macronutriments, sur 43 ans, et ceci sans la rubrique d'usage « Manufacturé » (cf. supra). Cette rubrique « Manufacturé » rapporte en effet des volumes de produits « primaires » (ex. graine d'arachide, produite localement et/ou importée) utilisés pour la production locale d'un ou plusieurs produits « secondaires » apparaissant dans les CDU (ex. huile et tourteau d'arachide) selon des rendements de transformation par ailleurs non renseignés. A ces difficultés s'ajoute le fait que certains produits comme les alcools ne sont pas issus d'un seul produit primaire, mais de plusieurs (céréales, raisins, sucres), produits pouvant être eux-mêmes des produits « secondaires » (sucres en particulier, issus de la betterave ou de la canne). Après de multiples tests effectués sur l'ensemble des pays et de la période 1961-2003, nous avons en particulier été amenés à traiter les sucres et mélasses comme des produits primaires, et donc à écarter de l'analyse les volumes de canne et betterave à sucre desquels ils étaient de prime abord issus<sup>47</sup>.

L'équilibre Ressources-Emplois n'est pas non plus atteint parce que les volumes d'exportation n'égalisent pas totalement les volumes d'importation. Ces problèmes et d'autres ont motivé une réforme de Faostat en 2006, réforme abandonnée en 2008 (§ 213). Avec les bilans caloriques tels que nous les avons élaborés, nous constatons pour notre part que le total des usages végétaux déclarés est, dans la grande majorité des cas, inférieur au total des disponibilités végétales<sup>48</sup>. Cette différence trouve diverses explications<sup>49</sup> et s'avère significative pour quelques pays, en premier lieu les Etats-Unis où près de 10% des disponibilités alimentaires végétales « disparaissent » ainsi au début des années 2000. Pour la grande majorité des pays cependant, ces écarts sont bien plus modestes : ils sont inférieurs à 3% (Etats-Unis inclus) au début des années 2000 à l'échelle mondiale, et inférieurs à 2% sur 43 ans pour 5 des 6 régions du MEA (Figure 5). Ces écarts représentent, avec les variations de stock, ce que nous appelons « Résidu » dans les simulations.

---

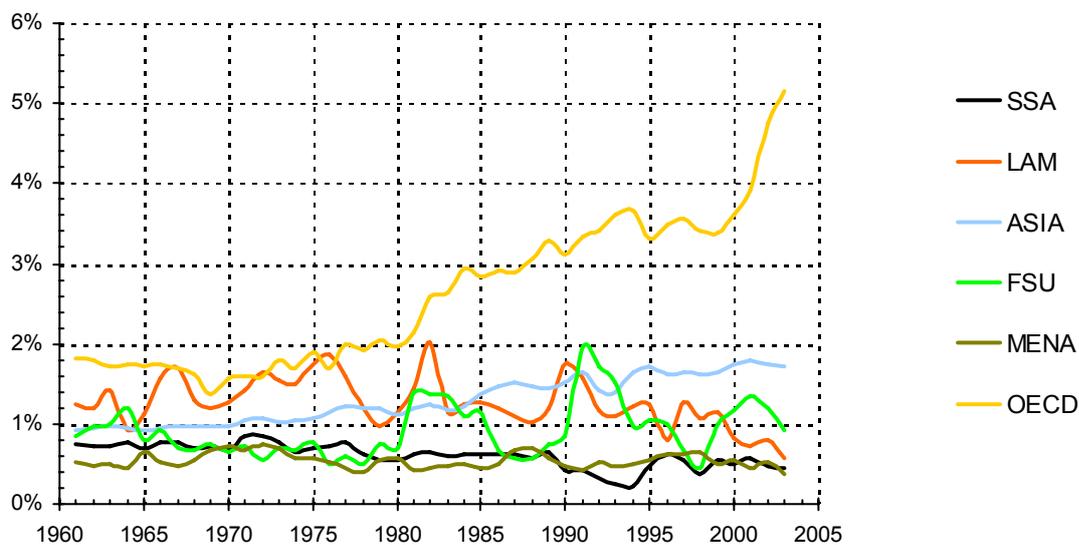
<sup>46</sup> Exemple : affectation de la ligne « Graisses Animales (Crue) » en *RUMI* alors que cette ligne concerne certainement aussi les compartiments *MONO* et *MARI*.

<sup>47</sup> Ces biomasses ne sont guère objets de transactions internationales, ce qui n'introduit pas de biais à ce niveau, mais peuvent comme en Chine être aussi utilisées comme *FEED*, et non uniquement pour la production de sucre.

<sup>48</sup> Pour les autres compartiments (animaux et aquatiques), les bilans s'avèrent bien mieux équilibrés.

<sup>49</sup> Absence de données CDU pour la Belgique et le Luxembourg (conservés dans notre base) à compter de l'année 2000 alors que cette région est importatrice nette de calories végétales (environ 50 Gkcal/jour depuis 1975), absence complète de données CDU pour des pays écartés pour cette raison de notre base (Irak, Afghanistan, Somalie...) alors qu'ils sont probablement importateurs nets de quantités significatives de biomasses alimentaires, sous-estimation de certains usages (dont gaspillages), surestimation des productions ou des exportations, erreurs dans notre traitement de la rubrique « Manufacturé », etc.

Figure 5. Ecart Disponibilités-Usages / Usages pour les calories végétales (1961-2003)



### 218. Biomasses non-alimentaires

Le terme « biomasse » désigne un vaste ensemble de matières objet de différentes conceptions et définitions, des organismes vivants en milieux souterrains ou immergés aux feuilles des arbres et oiseaux dans le ciel, des matières organiques en cours de formation à celles fossilisées sous forme de pétrole, gaz naturel, charbon, lignine ou tourbe. Par « biomasses non-alimentaires », nous désignons ici :

- les « coproduits » ou « résidus » organiques liés aux récoltes de « biomasses alimentaires » (§ 217) : pailles, rafles ... laine, cuir ;
- les produits de l'agriculture (y compris élevage et pêche) ne pouvant servir d'aliment à l'être humain sous leur forme primaire : caoutchouc, fibres de coton ou autre, soie, luzerne et autres fourrages cultivés, herbe des pâtures... ;
- les « coproduits » ou « résidus » organiques liés aux récoltes précédentes ;
- le bois sous ses diverses formes.

Diverses séries de données nationales FAO (CDU et autres) permettent d'évaluer directement (tabac, caoutchouc, fibres, laines, cuirs ... bois de chauffe, bois industriel) ou indirectement (résidus de récolte, biomasse forestière sur pied...) les tonnages de nombreuses biomasses non-alimentaires listées ci-dessus, et l'évolution de ces volumes durant les dernières décennies. Ces travaux doivent être repris, affinés, complétés. Notre outil de simulation propose pour l'heure d'intégrer à trois niveaux la problématique concurrence/complémentarité entre biomasses alimentaires et non-alimentaires :

- l'usage des terres, avec des surfaces plus ou moins importantes en forêts, en pâtures et en « surfaces cultivées non-alimentaires » (cf. *SCNA* § 215) ;
- des usages non-alimentaires de produits alimentaires, avec des « valorisations agricoles non-alimentaires » plus ou moins importantes (cf. *VANA* § 217)
- des modèles de productions animales explicitant, entre autres, des quantités de produits alimentaires utilisés pour l'alimentation des animaux (cf. *FEED* § 217, et modèles infra).

Dans une approche emplois-ressources telle qu'Agribiom, cette section s'attache à montrer l'importance et la difficulté d'estimer les liens entre productions animales et ressources végétales disponibles pour ces productions, puis à proposer un premier système d'estimation en mesure de capturer d'importantes différences de technologies existant dans le domaine à l'échelle mondiale.

(a) Des données et des représentations problématiques

L'élevage (d'animaux terrestres) fournit des aliments pour l'être humain (laits et produits dérivés, viandes, œufs...) que ce dernier tend à consommer en quantité plus importante quand son revenu s'élève (§ 222) : avec la croissance des populations humaines, la demande en produits animaux devrait continuer de s'intensifier à l'avenir. L'élevage fournit aussi de nombreux autres services, que ce soit pour l'épargne, le transport et la traction, la fertilisation des terres (déjections), la cuisson des repas (bouses séchées), l'éclairage, lavage ou cosmétique (suifs et autres graisses animales), l'habillement (laines, cuirs, plumes, duvets...), le recyclage des déchets organiques, l'entretien des paysages et d'espaces riches en carbone et biodiversité, etc., sans oublier les fonctions religieuses ou sociales (animaux de compagnie). Il emploie directement et indirectement un grand nombre de personnes, et utilise virtuellement plus de 80% des terres dites « agricoles », avec 3,3 milliards d'hectares de pâtures<sup>50</sup> et plus d'un demi-milliard d'hectares de terres cultivées<sup>51</sup>. L'élevage est aussi l'objet d'importantes inquiétudes aux plans sanitaire (épizooties...) et environnemental, notamment en ce qui concerne l'eau (consommation, pollutions...) et les émissions de gaz à effet de serre (Steinfeld *et al.*, 2006).

Cependant, malgré l'importance de l'élevage aux plans économique et écologique, ce dernier souffre, à l'échelle mondiale, d'un important déficit d'informations statistiques. Les productions autres qu'alimentaires sont souvent mal évaluées (parfois pas du tout), de même que les facteurs de productions autres que les « concentrés » (céréales et tourteaux) pouvant être affectés aux animaux (travail, capital, consommations intermédiaires tels que les produits vétérinaires...). Au simple plan de l'alimentation animale, cela est particulièrement problématique quand on doit représenter le processus de conversion des biomasses végétales en diverses biomasses animales, ceci à des fins de perspectives globales en lien avec l'usage des terres. Pour les gros herbivores et ruminants tout spécialement, à côté d'éventuels additifs biochimiques, bien d'autres biomasses que les concentrés peuvent être apportées, et le sont en réalité, en complément ou substitut : fourrages annuels cultivés<sup>52</sup>, herbes (vertes ou séchées) et autres biomasses issues des pâtures, savanes et divers autres parcours (y compris en forêts), résidus de récoltes (pailles, fanes, rafles...), résidus alimentaires (épluchures et autres restes),

<sup>50</sup> Cf. définition supra § 215 et données infra § 224

<sup>51</sup> D'après nos estimations basées sur des données FAO, en l'an 2000, 1/3 des calories végétales alimentaires consommées dans le monde sont utilisées comme aliments pour animaux, avec d'importantes variations par région de ce taux (§ 223).

<sup>52</sup> Dans les séries CDU de la FAO que nous avons mobilisées, seuls 5 fourrages étaient renseignés : luzerne (*Alfalfa for forage and silage*), trèfle (*Clover for forage and silage*), maïs (*Maize for forage and silage*), ray-grass (*Rye grass for forage & silage*) et sorgho (*Sorghum for forage and silage*) ; par rapport à la réalité des productions fourragères dans le monde, cette liste est étroite ; pour la Chine, l'Inde et le Brésil, il n'y avait d'ailleurs aucune statistique pour l'un ou l'autre de ces fourrages ; cette étroitesse et ses lacunes nous ont conduit à ne pas utiliser ces données.

etc. Certains auteurs tentent de quantifier aux échelles nationales ou continentales ces différentes sources d'alimentation animale, tels Devendra et Sevilla (2002), Wirsenius (2003), Bouwman et al. (2005) ou encore Smeets et al. (2007). A côté des quantités, l'évaluation de la qualité de ces biomasses est également très importante mais aussi mal connue (matière sèche, digestibilité, énergie, protéines, etc.). Pour ces sources d'alimentation animale comme pour les autres (concentrés) s'ajoute une troisième importante lacune statistique : la répartition de ces consommations animales de biomasses par espèce (équins, bovins, ovins, porcins, volailles...) et/ou par produit animal (laits, viandes...).

Les exercices de prospective agricole et alimentaire en viennent pourtant à utiliser in fine des taux de consommation/conversion  $A (a_{11}, \dots, a_{nk})$  de telle ou telle biomasse  $I (i_1, \dots, i_n)$  par/en produit animal  $P (p_1, \dots, p_k)$ . Les biomasses  $I$  se limitent généralement à des volumes de concentrés (céréales, tourteaux), et les produits  $P$  à des volumes de laits (vache, bufflesse, chèvre...), viandes (bovines, porcines...), œufs, ou bien un type de tête animal (veau, vache, taureau...). Les taux  $A$  sont fonction des unités de volume, qui peuvent être des kilogrammes de produit (Bouwman *et al.*, 2005, Delgado *et al.*, 1999), des unités fourragères ou des kilogrammes de protéines (Sebillote, 2001), ou encore des kilocalories (Collomb, 1999, Griffon, 2006, Malassis et Padilla, 1986). Ces taux  $A$  sont évalués, grosso modo, de deux grandes manières que nous dénommons successivement « l'approche physiologique » et « l'approche statistique ».

L'approche physiologique s'attache à évaluer les taux  $A$  en fonction des besoins physiologiques individuels des animaux (pour l'entretien et la collecte de nourriture, une lactation plus ou moins abondante, un gain moyen quotidien en viande plus ou moins important, un effort journalier de traction...), de la composition des cheptels (espèces et races animales, âge, sexe et poids des animaux) et des caractéristiques locales des biomasses  $I$  à disposition. Cette approche conduit, concrètement, à devoir échafauder un grand nombre d'hypothèses lorsqu'on travaille aux échelles nationales, sur le passé et plus encore sur l'avenir. L'approche statistique consiste de son côté à évaluer  $A$  en fonction de volumes de consommations  $P$  observés un temps donné sur un espace donné et, pour l'avenir, à conserver ou modifier  $A$  selon diverses hypothèses d'experts portant, d'une part toutes les autres sources d'alimentation et autres facteurs de production, et, d'autre part, sur l'impact supposé de ces hypothèses sur  $A$ .

Dans les deux cas (approche physiologique et approche statistique), les représentations et coefficients utilisés pour simuler l'avenir tendent en pratique à souvent se rapprocher des situations aujourd'hui les mieux référencées : élevages industrialisés et stations expérimentales attachées à améliorer la productivité de ces élevages en lait, viandes ou œufs. Si d'énormes progrès ont été accomplis et seront encore accomplis dans les formes industrielles de production, on ne peut exclure d'emblée, dans le raisonnement prospectif, que d'autres formes d'élevage perdurent, s'améliorent ou émergent à l'avenir, notamment pour valoriser efficacement certaines ressources locales, ou fournir divers revenus et services à des agro-systèmes et populations faiblement dotées en capital financier et logistique, comme aujourd'hui dans la plupart des pays du Sud.

Tout cet ensemble de considérations nous a conduit à essayer d'améliorer la représentation et modélisation des productions alimentaires animales à l'échelle mondiale. Notre approche fut résolument statistique, et s'est structurée en deux grandes étapes :

(1) l'élaboration d'une base mettant en correspondance diverses données nationales (i) relatives aux productions animales et aux facteurs de production agricoles, (ii) sur un nombre

d'années important pour disposer d'un échantillon satisfaisant de mesures et d'évolutions technologiques variées (1961-2003), (iii) suivant des agrégations et unités susceptibles de révéler des phénomènes généraux et robustes (compartiments « végétaux », « ruminants et gros herbivores », « monogastriques »... quantifiés en calories, protéines, ou lipides alimentaires) (§ 212, 218) ;

(2) la recherche, dans cette base de données que nous aurions aimé plus complète (fourrages annuels, qualité des pâtures, résidus, etc. : cf. supra), de relations statistiques entre productions alimentaires animales et variables susceptibles d'expliquer ces productions ; cette recherche s'est orientée vers l'élaboration de « fonctions de productions » animales (cf. infra). Après la première étape, nous montrons en particulier que la productivité moyenne du FEED végétal (céréales et tourteaux d'oléagineux en grande partie : § 217) est effectivement très variable dans l'espace et le temps, en terme de calories totales (Figure 6) ou encore de protéines (Figure 7). Simuler à long terme les productions alimentaires animales avec un coefficient fixe relatif à ces seules quantités de facteur présente donc des limites que la seconde étape (fonctions de productions animales) s'attache à dépasser.

#### (b) Des fonctions de productions animales

En microéconomie, une fonction de production exprime la relation entre les entrants d'une entreprise et sa production. Elle indique, sous forme d'équation ou de graphique, ce que la firme peut produire à partir de différentes quantités et combinaisons d'entrants. De manière générale, une fonction de production s'exprime sous la forme  $Q = f(x_1, \dots, x_n)$  où  $Q$  est la quantité produite d'un bien, et  $x_1, \dots, x_n$  sont des quantités de facteurs de production (travail, capital, consommations intermédiaires...). Cette fonction peut prendre différentes formes (linéaire, quadratique ... Cobb-Douglas, CES...) selon que les rendements marginaux sont très décroissants ou pas, qu'il existe des économies d'échelle ou pas, que les facteurs de productions sont très substituables ou pas, etc. Cette forme est précisée par les données et par les aspects de la technologie que l'on veut étudier.

Nous avons cherché à établir des fonctions de production :

- à l'échelle de pays (ou de pays réunis en régions) et non de firmes, ce qui conduit certains auteurs à utiliser le préfixe « méta » ou « *cross-countries* » pour qualifier de telles fonctions ;
- avec des données nationales de panel sur 43 ans (1961-2003) ;
- pour des productions annuelles alimentaires d'origine animale (laits, viandes, œufs...) converties en calories ou protéines (Gkcal) puis regroupées en deux catégories : production de « ruminants » et gros herbivores d'une part (*RUMI*), production de « monogastriques » d'autre part (*MONO*) ;
- avec des facteurs de production ayant tout ou partie servi à ces deux productions alimentaires, facteurs non exhaustifs et plus ou moins bien évalués (*proxies*) chaque année aux échelles nationales : *FEED* d'origine végétale, animale et aquatique (Gkcal de calories totales ou de calories fournies par les protéines uniquement), pâtures (milliers d'hectares), travail humain (milliers d'actifs agricoles), tracteurs (unités), etc.

Nous avons donc cherché à élaborer des fonctions de production multi-produits dont la forme générale est  $F(X,Y)=0$ , où  $X = (x_1, \dots, x_n)$  est le vecteur de facteurs de production, et  $Y = (y_1, \dots, y_m)$  le vecteur de produits obtenus avec ces facteurs. Ce type de fonctions va permettre, en particulier, de distinguer la productivité du *FEED* en terme de produits de ruminants d'une part, de produits de monogastriques d'autre part. Par contre, ces fonctions sont plus difficile à estimer que les fonctions mono-produit lorsque l'allocation des facteurs aux produits est inconnue, comme c'est ici souvent le cas (nous connaissons par exemple les

quantités totales de *FEED*, mais pas celles utilisées respectivement par les ruminants et par les monogastriques). L'allocation doit donc être déduite des estimations agrégées, suivant différentes méthodes à disposition (Just *et al.*, 1983, S. Mishra, 2007).

Par ailleurs, il existe dans l'estimation de fonction de production des risques importants de biais identifiés dans la littérature, notamment liés à l'endogénéité des facteurs de production. La correction de ces biais nécessite des méthodes d'estimation adaptées, selon la forme fonctionnelle et selon l'utilisation que l'on veut faire de la fonction de production. Nous avons retenu trois méthodes principales d'estimation :

- (i) un modèle autorégressif qui permet d'éliminer efficacement l'autocorrélation (le terme d'erreur de l'année  $t$  est utilisé comme variable explicative de l'année  $t+1$ ) ;
- (ii) une estimation par les moindres carrés généralisés qui diminue nettement le biais d'hétéroscédasticité, et donne dans la plupart des cas des résultats d'estimation proches du modèle autorégressif ;
- (iii) différents modèles à effet fixe permettant une correction plus ou moins bonne des biais d'endogénéité.

Les travaux ont conduit à élaborer et tester diverses fonctions de production :

- (a) avec un nombre plus ou moins important de proxys sur les facteurs ( $x_1, \dots, x_n$ ), et des tentatives pour raffiner certains d'entre eux (pâtures en particulier) en les combinant à d'autres variables de la base de données à disposition ;
- (b) avec des unités d'outputs (productions alimentaires animales) et d'inputs (*FEED*) exprimées en calories totales, ou bien en calories issues de protéines uniquement<sup>53</sup>, ceci pour apprécier – en particulier – l'effet « tourteaux d'oléagineux » (soja notamment) qui s'imposent depuis les années 1960 dans les élevages comme compléments en protéines des rations de base ;
- (c) avec ou sans « *trend* » (pour évaluer un « progrès technique »<sup>54</sup> annuel) ou « *dummies* » de nature temporelle (pour capter la spécificité de certaines années) ou géographique (pour capter des spécificités régionales constantes dans le temps) ;
- (d) avec l'objectif de modéliser des modes de productions à l'échelle de grandes régions (type régions du MEA), ou bien de modéliser des grands modèles de production (types « intensif-industriel », « extensif-agricole », etc.) ; nous parlerons dans le premier cas de « fonctions géographiques » et, dans le second, de « fonctions typologiques » ;
- (e) avec différentes formes fonctionnelles, linéaires et quadratiques en particulier.

Pour la prospective Agrimonde, le choix s'est porté sur des fonctions :

- linéaires ;
- géographiques et, en l'occurrence, pour chacune des 6 régions du MEA (12 à 40 pays par région selon les cas) ;
- sans *trend* ni *dummies* ;
- utilisant comme unité de travail la calorie issue des protéines ; pour les simulations, les taux de conversion en calories totales sont calés sur les dernières valeurs observées (2003) mais peuvent être modifiés suivant les scénarios imaginés (augmentation/diminution des teneurs en protéines du FEED par exemple) ;
- organisées en un système de deux équations (productions de protéines de ruminants d'une part, de monogastriques d'autre part) comportant trois facteurs explicatifs : les protéines apportées sous forme de FEED (origine végétale et animale), les hectares de pâture, le niveau

---

<sup>53</sup> Rappel : 1 g de protéines fournit en moyenne 4 kcal

<sup>54</sup> Progrès de production inexplicé par les facteurs de production entrés dans la fonction

de production du « substitut » (production protéique de monogastriques ou de ruminants selon les cas).

Ces fonctions permettent de reproduire assez fidèlement l'évolution des productions animales régionales durant plus de 40 années passées (Annexe 12). La plupart des autres fonctions élaborées peuvent reproduire encore plus fidèlement ces évolutions passées, ce qui n'était pas ici l'objectif. Pour la prospective Agrimonde, il s'agissait en effet de disposer de fonctions (i) limitant les hypothèses à formuler pour les simulations (Agrimonde est un exercice collectif), (ii) en mesure d'accepter des hypothèses de simulation relativement éloignées des valeurs utilisées pour élaborer chaque modèle (Agrimonde étant un exercice de prospective, il peut par définition être amené à imaginer des mondes très différents de ceux observés dans le passé).

Nous avons retenu ici une forme linéaire pour plusieurs raisons :

- (1) parmi les formes testées, c'est la forme la plus stable aux changements d'échelle géographique<sup>55</sup> ; une fois la fonction de production estimée avec des données nationales, les coefficients de productivité marginale de chaque facteur valent aussi bien pour le pays d'une région que la région toute entière, ce qui évite, pour les simulations, de formuler des hypothèses pour chaque pays de la région considérée ;
- (2) les coefficients d'estimation peuvent être rapprochés de coefficients physiologiques ; par exemple, un coefficient de 0,2 associé aux calories de FEED signifie qu'une calorie supplémentaire de ce FEED produit 0,2 calorie supplémentaire de la production animale considérée (soit un taux de conversion marginale de 5 calories de FEED par calorie animale) ; ce coefficient est appelée « productivité marginale »<sup>56</sup> ;
- (3) la forme linéaire est compatible avec une productivité moyenne décroissante du FEED comme on l'observe empiriquement (Figure 8)<sup>57</sup> ; elle est par ailleurs compatible avec une substitution (à taux fixe) des facteurs et une substitution (à taux fixe) des outputs.

La forme générique des fonctions utilisées pour la prospective Agrimonde est présentée ci-après (Tableau 7, Tableau 8), ainsi que leur estimation par les moindres carrés généralisés (Tableau 9, Tableau 10). Pour les simulations, après avoir formulé des hypothèses sur les quantités régionales de FEED et de pâtures à un horizon de temps plus ou moins éloigné, nous résolvons pour chaque région un système à deux équations et deux inconnues (*PROD\_RUMI* et *PROD\_MONO*). Le résultat de cette procédure respecte les contraintes des deux fonctions de production, mais exclut toute hypothèse de répartition a priori des protéines fournies par les ruminants d'une part, les monogastriques d'autre part, ce que certains exercices de prospective pourraient souhaiter représenter ou tester.

---

<sup>55</sup> Plus stable y compris que la forme Cobb Douglas à rendement d'échelle constant

<sup>56</sup> Une productivité marginale constante (comme nous l'impose la forme linéaire) est une restriction puisqu'elle ne permet pas de représenter les effets de second ordre. Elle donne en revanche plus de robustesse au modèle.

<sup>57</sup> Lorsque la valeur du FEED est faible, la production est essentiellement due au terme constant et aux pâtures, et la productivité moyenne du FEED est alors élevée (i.e. le rapport Production / FEED est élevé). A mesure que la part relative du FEED dans la production augmente, sa productivité moyenne diminue (le rapport Production / FEED diminue).

Figure 6. Input calorique en FEED végétal / Output de calories alimentaires animales (1961-2003)

Kcal végétales (Feed) / Kcal animales (ruminants et monogastriques)

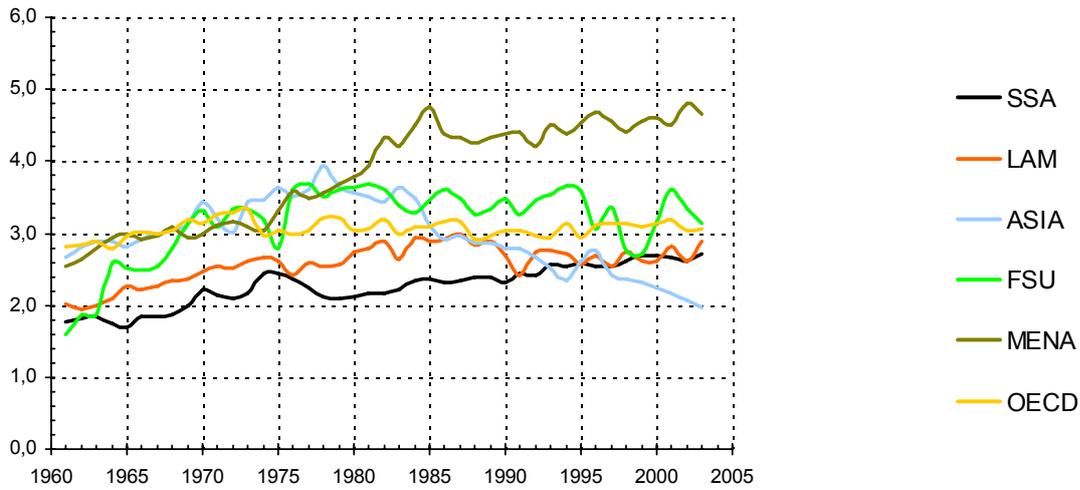


Figure 7. Input protéique en FEED végétal / Output de protéines alimentaires animales (1961-2003)

Protéines végétales (Feed) / Protéines animales (ruminants et monogastriques)

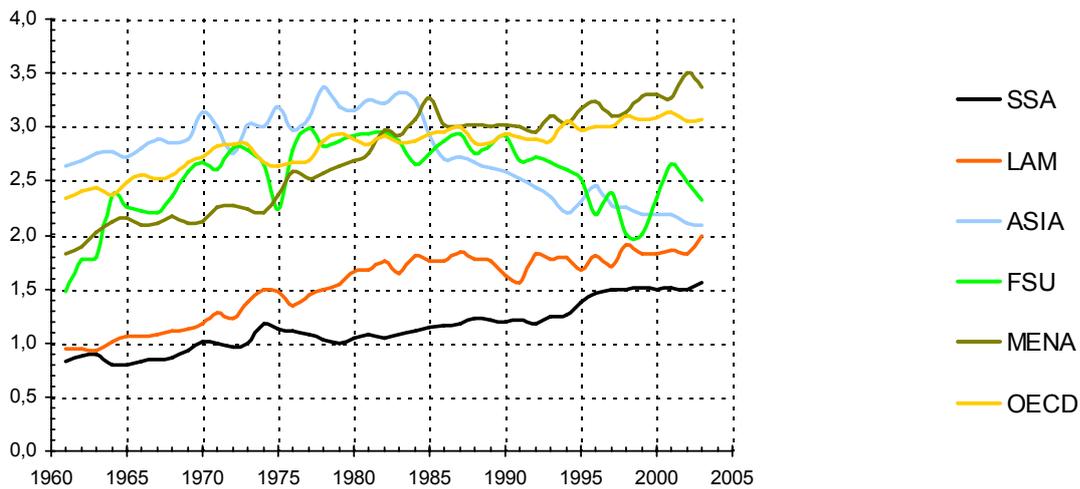


Figure 8. Productivité moyenne décroissante du FEED (1961-2003)

protéines animales (Rumi & et Mono) / protéines végétales (Feed)

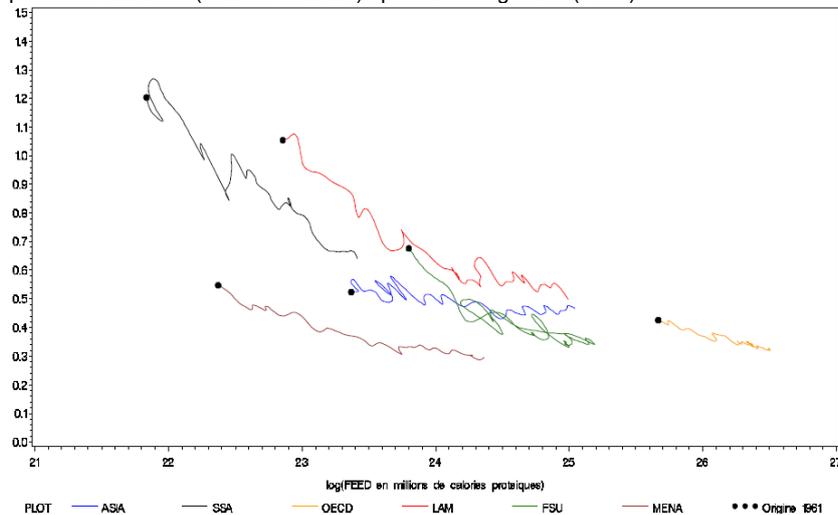


Tableau 7. Fonctions nationales génériques de productions animales utilisées par Agrimonde

$PROD\_RUMI_k = \alpha_0^J + \alpha_1^J FEED_k + \alpha_2^J . P\hat{A}TURES_k + \beta^J PROD\_MONO_k$	(1)
$PROD\_MONO_k = \gamma_0^J + \gamma_1^J FEED_k + \delta^J PROD\_RUMI_k$	(2)
Avec :	
- $k$ un pays appartenant à la région $J$	
- $PROD\_RUMI_k$ la production de protéines alimentaires issues de ruminants et gros herbivores, exprimée en kcal par an, pour le pays $k$	
- $PROD\_MONO_k$ la production de protéines alimentaires issues de monogastriques du pays $k$	
- $\alpha_0^J$ le terme constant de la région $J$ obtenu par l'estimation de la fonction nationale type de production de ruminants de la région $J$	
- $\alpha_1^J$ la productivité marginale du FEED (origine végétale et animale) dans la région $J$ , exprimée en kcal de protéines de ruminants ( $PROD\_RUMI$ ) par kcal de protéines de feed.	
- $FEED_k$ la consommation de FEED du pays $k$ , en kcal d'origine protéique	
- $\alpha_2^J$ la productivité marginale des pâtures dans la région $J$ , exprimée en kcal d'origine protéique par hectare de pâture	
- $P\hat{A}TURES_k$ la surface de prairie permanente du pays $k$	
- $\beta^J$ le coefficient de substitution entre monogastriques et ruminants dans la région $J$	
- $\gamma_0^J$ le terme constant de la région $J$ obtenu par l'estimation de la fonction nationale type de production de monogastriques de la région $J$	
- $\gamma_1^J$ la productivité marginale du FEED (origine végétale et animale) dans la région $J$ , exprimée en kcal de protéines de monogastriques ( $PROD\_MONO$ ) par kcal de protéines de feed.	
- $\delta^J$ le coefficient de substitution entre ruminants et monogastriques dans la région $J$	

Tableau 8. Fonctions régionales génériques de productions animales utilisées par Agrimonde

$PROD\_RUMI_J = \sum_{k \in J} \alpha_0^J + \alpha_1^J \sum_{k \in J} FEED_k + \alpha_2^J . \sum_{k \in J} P\hat{A}TURES_k + \beta^J \sum_{k \in J} PROD\_MONO_k$	(3)
$PROD\_MONO_J = \sum_{k \in J} \gamma_0^J + \gamma_1^J \sum_{k \in J} FEED_k + \delta^J \sum_{k \in J} PROD\_RUMI_k$	(4)
Avec :	
- $J$ une région constituée de pays $k$	
- $PROD\_RUMI_J$ la production de protéines alimentaires issues de ruminants et gros herbivores, exprimée en kcal par an, pour la région $J$	
- $PROD\_MONO_J$ la production de protéines alimentaires issues de monogastriques dans la région $J$	

Tableau 9. Fonctions nationales de productions animales RUMI utilisées par Agrimonde

	OECD	ASIA	LAM	SSA	FSU	MENA
$\alpha_0^J$ (Intercept)	251 075 226***	20 919 081	5 903 807*	-2 759 608	42 720 057***	19 928 566***
$\alpha_1^J$ (FEED)	0,39***	0,17***	0,25***	0,33***	0,26***	0,24***
$\alpha_2^J$ (PASTURES)	6411***	3000	12881***	3348***	2758***	4081***
$\beta^J$ (PROD MONO)	-1,89***	-	-0,23	-	-0,02	-0,87***
$R^2$	0,83	0,36	0,79	0,76	0,94	0,81

Tableau 10. Fonctions nationales de productions animales MONO utilisées par Agrimonde

	OECD	ASIA	LAM	SSA	FSU	MENA
$\gamma_0^J$ (Intercept)	-16 343 933***	-295 377 986***	1 749 431	1 001 663***	-368 017	12 688 321***
$\gamma_1^J$ (FEED)	0,15 ***	0,39***	0,20***	0,18***	0,08***	0,16***
$\gamma_2^J$ (PASTURE)	-	-	-	-	-	-
$\delta^J$ (PROD RUMI)	-0,14 ***	-0,53***	-	-0,05***	-0,01	-0,29***
$R^2$	0,99	0,98	0,97	0,94	0,96	0,92

\*\*\* significatif au seuil de 1%

\* significatif au seuil de 10%

## 2110. Interface et simulations interactives

Un objectif important d'Agribiom<sup>58</sup> est d'aider et faciliter des débats collectifs sur les productions, échanges et usages passés et à venir de biomasses à l'échelle globale, de favoriser l'émergence de visions ou questions communes sur les évolutions passées et futures. Pour devenir cet outil « médiateur », un soin et un temps importants ont été consacrés à la création d'une interface sous Microsoft Access<sup>®</sup> (et langage SQL). Cette interface permet, fin 2008, et suivant différentes échelles possibles d'analyse géographique (dont les 6 régions du MEA) :

- de représenter ou croiser visuellement (graphiques) des grandeurs issues d'un traitement de plusieurs millions de données historiques (§ 213 à 217, Annexes 4-11), notamment les variables ou « paramètres » servant à simuler les productions, échanges et usages de biomasses alimentaires (§ 217 à 219) ;
- de décrire et tester des modèles élaborés en interne (pour l'instant : fonctions de productions animales), en comparant leurs résultats à ceux observés dans le passé (1961-2003), en modifiant aisément leurs coefficients (productivités marginales en particulier) ou mode de résolution, en visualisant instantanément leurs résultats avec de nouvelles données ;
- de saisir, pour tel ou tel scénario envisagé (ou variantes), des hypothèses de paramètres et de modèles, puis de débattre, retravailler et d'arrêter ces hypothèses en simulant collectivement avec l'interface un équilibre physique global des productions, usages, et échanges de biomasses alimentaires ;
- d'archiver les résultats quantitatifs obtenus avec les hypothèses associées, notamment pour les rendre transparents auprès de tiers, et permettre critiques ou approfondissements des scénarios et hypothèses formulés.

L'interface est concrètement structurée en plusieurs fenêtres ou « domaines de paramètres » (Populations humaines, Consommations alimentaires, Occupations des terres, Productions et productivités alimentaires, Echanges alimentaires, Usages des produits alimentaires, Modèles de productions animales...) qui permettent de visualiser des données historiques dans chacun des domaines concernés, puis d'enregistrer (ou calculer), dans chacun de ces domaines, des valeurs de scénarios (ou variantes de scénarios) à tel ou tel horizon de temps. Une fenêtre particulière permet, en dernier ressort :

- de récapituler, pour chaque région du monde considérée (ici zonage MEA) et à l'horizon de temps choisi, les principales hypothèses de scénario formulées (populations, rations, surfaces...) et leurs implications en terme d'utilisations, productions et échanges nets (en Gkcal/jour) pour les 5 compartiments de biomasses alimentaires (VEGE, AQUA, MARI, RUMI, MONO),
- d'ajuster ces hypothèses pour obtenir un équilibre physique global à l'échelle mondiale, certains ajustements nécessitant l'utilisation d'autres fenêtres/outils de l'interface pour être correctement effectués, notamment en ce qui concerne les productions animales<sup>59</sup>.

---

<sup>58</sup> Conception et réalisation : B. Dorin (Cirad, Umr Cired), avec la contribution de T. Le Cotty (Cirad, Umr Cired) pour les fonctions de productions animales, et les aides ponctuelles de J.-F. Foucher (Cirad, Dsi) pour certaines programmations sous Access/Sql.

<sup>59</sup> On notera également que dans sa version 2008, l'interface ne permet encore pas d'associer aux hypothèses et aux équilibres physiques obtenus un certain nombre d'évaluations relatives, en particulier, aux consommations induites en énergies ou en eau, aux emplois agricoles, ou encore aux émissions/stockages de GES : c'était un objectif de départ, et cela demeure un objectif de développement à plus ou moins long terme.

Une simulation via l'interface Agribiom consiste ainsi à illustrer un équilibre (ou un déséquilibre) entre des usages envisagés et des ressources envisagées par région puis globalement. Cette illustration implique, pour chaque région considérée, d'explicitier des hypothèses (i) sur les éléments de notre équation emplois-ressources (§ 217)<sup>60</sup>, (ii) sur les modèles utilisés pour renseigner certains de ces éléments (productions animales en l'occurrence), (iii) sur les échanges internationaux, notamment sur les préférences régionales d'acquisition de ressources à l'extérieur (préfère-t-on importer des aliments pour animaux ou les produits animaux eux-mêmes ? avec de préférence quelle région capable de les fournir ?). Quand l'ensemble de ces hypothèses ne sont pas compatibles, ou que l'on veut simuler l'impact d'une modification de l'une d'entre elles, il faut se doter de critères d'ajustement, qui sélectionnent ce qui varie et ce qui reste fixe, et qui explicite comment varie ce qui s'ajuste.

Dans un modèle d'équilibre économique tel qu'IMPACT (IFPRI), les règles de l'ajustement sont explicites, et exogènes. Le modélisateur les connaît avant de procéder à une simulation. Elles sont définies par un ensemble d'élasticités et de contraintes sur certaines variables physiques ou économiques qui aboutissent à des fonctions d'offre et de demande. En revanche, les quantités (productions, consommations, surfaces, etc.) et les prix d'équilibre sont généralement endogènes. Une difficulté souvent évoquée de ces modèles réside probablement dans le choix des élasticités, c'est-à-dire des paramètres représentant des réactions des agents aux variations de l'environnement économique : de combien augmente l'offre de blé dans telle région lorsque le prix du blé dans la région augmente de 1% ? de combien diminue la consommation dans telle région si le prix dans cette région monte de 1% ? de combien augmente la consommation de blé dans telle région lorsque le revenu de la région s'élève de 1% ? Ces élasticités tentent de fournir des réactions stéréotypées de la production et de la consommation aux variations de prix ou de variables économiques homogènes aux prix (revenus notamment). Elles ont la grande qualité de rendre possible la réalisation simultanée de nombreux ajustements décentralisés tout en maintenant l'équilibre économique offre-demande. Ainsi, une demande qui serait insatisfaite se traduirait de manière endogène par une hausse du prix qui engendrerait à la fois un accroissement de la production et une baisse de la consommation demandée. L'équilibre de l'offre et de la demande est donc assuré en permanence par l'ajustement des prix, et la demande (solvable) est toujours satisfaite par construction. Mais cette catégorie de modèles n'est pas adaptée pour représenter un monde orienté par la satisfaction de besoins (nécessités)<sup>61</sup> ; dans ce type de modélisation, ce n'est par exemple pas le manque de nutriments de certaines personnes (insatisfaction d'un besoin) qui accroît la production, mais bien l'insatisfaction de leur demande, qui dépend de leur capacité d'achat, des préférences et de l'information.

Dans les simulations Agribiom, les quantités et autres grandeurs physiques sont exogènes (i.e. choisies par le groupe). A chaque jeu d'hypothèses, on constate un certain déséquilibre, avec sa répartition par région et compartiment de biomasse : ce déséquilibre est l'information endogène (et pertinente) de la simulation. A partir de ce déséquilibre, il existe une infinité de façons de parvenir à l'ajustement puisque, pratiquement, chaque élément du choix est continu. De ce point de vue, le cheminement proposé par le groupe pour parvenir à l'équilibre,

---

<sup>60</sup> Variations de stocks exceptés qui, pour la simulation de l'année de base (exemple : 2003) destinée à servir de référence pour l'étude d'autres simulations, sont intégrés dans une rubrique d'usage appelée « Résidu ». Cette rubrique « Résidu » permet également d'intégrer des montants liés à des erreurs ou imprécisions statistiques constatées dans le passé (§ 217), montants sans lesquels les bilans ne seraient pas parfaitement équilibrés, et sans lesquels les comparaisons de simulations ensuite effectuées seraient biaisées.

<sup>61</sup> Physiologiques, sociales, environnementales...

constitué d'une modification par tâtonnement de certains éléments suivant certaines règles<sup>62</sup>, définit un ensemble de conditions suffisantes pour parvenir à l'équilibre emploi-ressources. Il peut également être intéressant, pour la réflexion, de ne pas équilibrer automatiquement l'économie afin d'exhiber des excédents et des déficits, et débattre collectivement des différentes voies ou conditions pour combler ces déficits. On peut aussi débattre les différentes sources de réponse de la production aux besoins en simulant des extrêmes : un accroissement de besoins peut par exemple engendrer un accroissement des rendements sans accroissement de surface cultivée, ou inversement. Les réponses extrêmes ne sont probablement pas les plus réalistes, mais elles peuvent être utiles à un exercice de prospective.

Ainsi, la valeur ajoutée de l'interface Agribiom est dans l'apprentissage du rôle de chaque variable, modèle et règles de décision utilisés dans l'établissement d'un équilibre, et non seulement dans l'image finale de l'équilibre emploi ressource proposé. C'est en cela que l'interface est interactive, et que son premier grand intérêt est de fonctionner dans l'interaction.

---

<sup>62</sup> Exemple : (i) si la région est déficitaire en productions végétales, elle importe les calories végétales nécessaires pour couvrir les besoins alimentaires humains et les calories végétales nécessaires pour l'autosuffisance en productions animale ; (ii) les importations proviennent des régions excédentaires dans l'ordre décroissant des quantités excédentaires (les excédents du plus excédentaire sont d'abord exportés, etc.) ; (iii) si les excédents mondiaux ne peuvent couvrir les besoins des régions déficitaires, les variables exogènes choisies par le groupe sont révisées à la hausse (surfaces, rendements...).

## 22. Rétrospective 1961-2003

### 221. Populations humaines

Figure 9. Populations humaines (1961-2003)

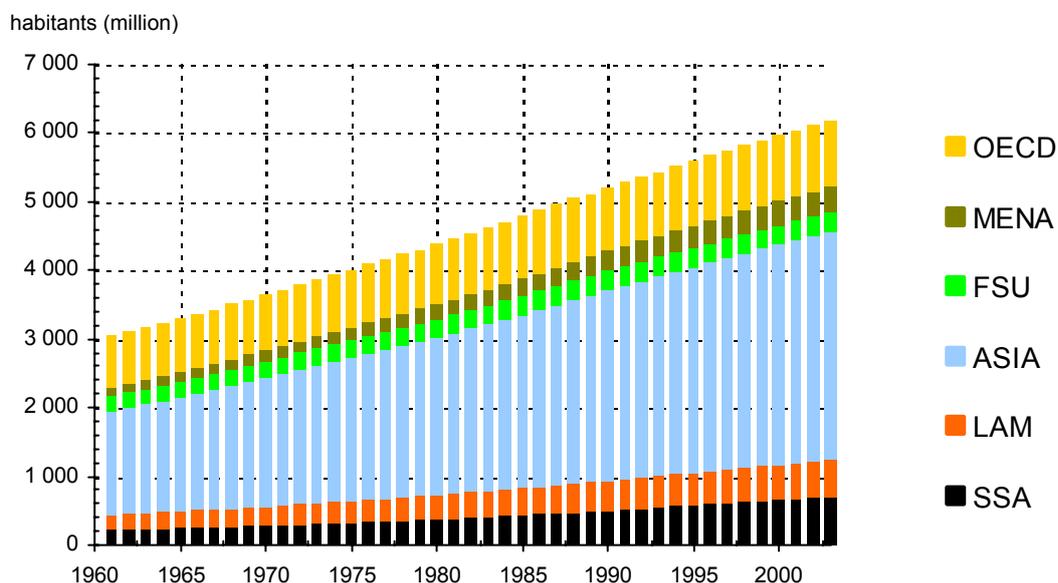
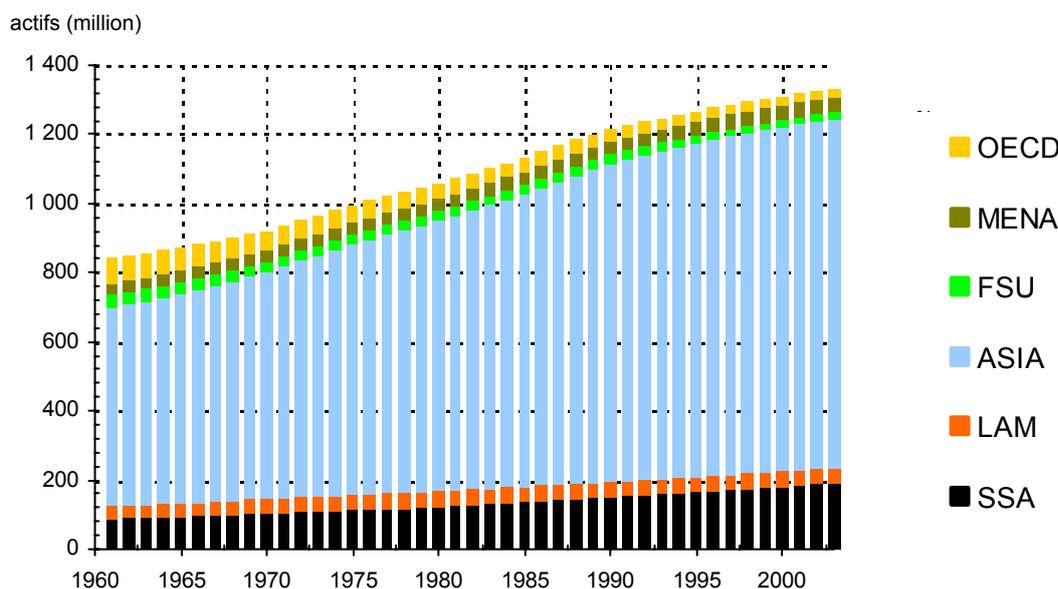


Figure 10. Actifs agricoles (1961-2003)



La population humaine a plus que doublé en quatre décennies, passant de 3 milliards d'individus en 1961 à près de 6,2 en 2003, l'équivalent d'une croissance annuelle moyenne de 1,7%. Plus de la moitié de cette population est concentrée en ASIE (54% en 2003), région où la croissance démographique (1,9% par an) n'a pourtant pas été la plus élevée (2,6 et 2,7% en MENA et SSA) (Figure 9). L'ASIE accueille dans une plus grande proportion encore les paysans de la planète puisqu'on y dénombre les trois-quarts des actifs agricoles au début des années 2000 (Figure 10), soit plus d'un milliard d'individus vivant majoritairement en zones rurales avec leur famille et d'autres actifs dépendant directement du secteur (commerçants, fournisseurs d'intrants agricoles, transformateurs de produits alimentaires, etc.). Cette

population active agricole n'a cessé de croître en ASIE comme dans la plupart des autres régions (LAM, MENA et plus encore SSA), mais à un rythme nettement plus faible que l'urbanisation des populations (Annexe 4). En 2003, une personne sur deux dans le monde vit en ville contre seulement une sur trois au début des années 1960. Mais il existe d'importantes différences régionales : le taux d'urbanisation de la population n'est que de 36% en ASIE et SSA alors qu'il dépasse 75% en LAM et OCDE. Dans cette dernière région la plus peuplée au monde après l'ASIE (presque 1 milliard d'habitants en 2003), la population active agricole a été divisée par 70% en 42 ans et ne dépasse guère 20 millions de personnes aujourd'hui.

## 222. Consommations alimentaires

Figure 11. Calories alimentaires disponibles pour l'alimentation (1961-2003)

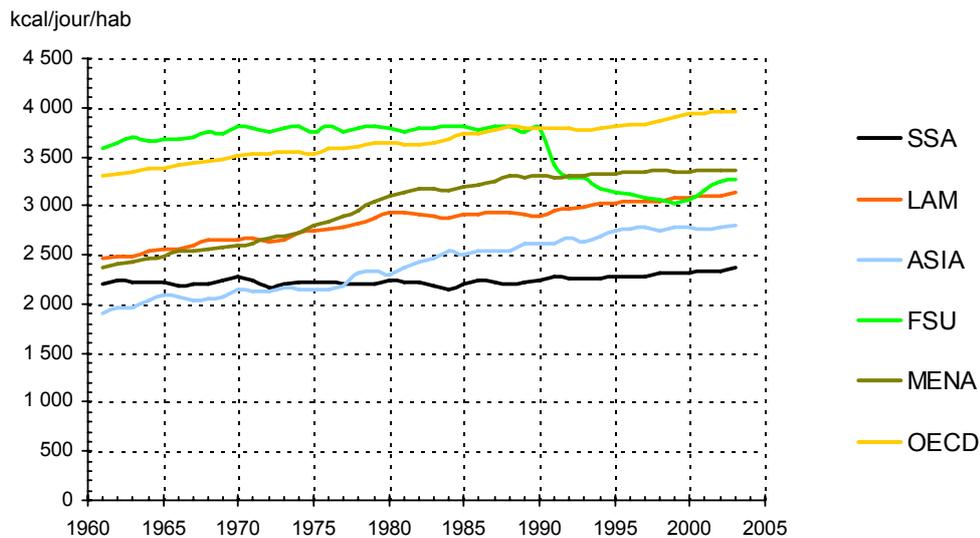
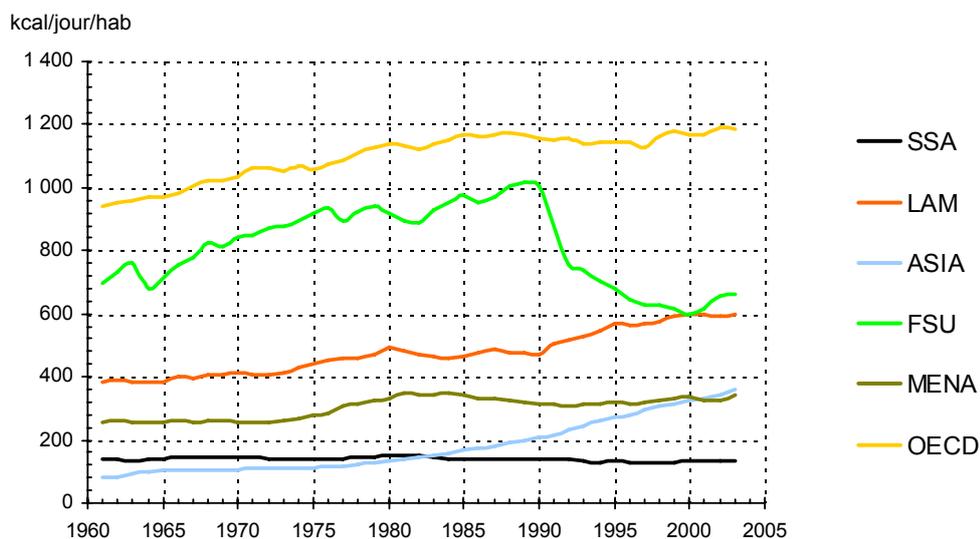


Figure 12. Calories alimentaires animales disponibles pour l'alimentation (1961-2003)



Entre 1961 et 2003, les populations humaines doublent leur effectif et multiplient par 2,5 leur consommation alimentaire en calories, consommation qui avoisine 19 000 Gkcal/j au début des années 2000. Ainsi, à l'échelle mondiale, la consommation apparente par personne<sup>63</sup>

<sup>63</sup> FOOD / POPU : cf. définitions § 217 ; cette grandeur est souvent appelée « disponibilité alimentaire »

passe d'un peu moins de 2500 kcal/j en 1961 à un peu plus de 3000 en 2003. Mais ces données masquent d'importantes disparités, entre régions du monde, entre pays de ces régions, et, au sein de ces pays, entre (et au sein...) des ménages. A l'échelle des régions du MEA, la disponibilité journalière moyenne avoisine 4000 kcal par personne en 2003 en OCDE mais ne dépasse toujours pas 2500 kcal en SSA (Figure 11). L'examen de ces différences révèle qu'elles peuvent en grande partie être attribuées à des consommations plus ou moins importantes de produits animaux (laits, viandes, œufs...) : ces derniers apportent près de 1200 kcal sur 4000 (30%) en OCDE, alors qu'à l'autre extrême, en SSA, ils ne contribuent qu'à une hauteur d'environ 135 kcal sur 2400 (moins de 6%) (Figure 12, Annexe 5). Les produits animaux étant particulièrement riches en protéines (viandes, œufs...) et/ou lipides (beurre, crème...), les différences régionales de disponibilité alimentaire s'avèrent particulièrement prononcées pour ces deux macronutriments ; selon nos estimations, en 2003 :

- 125 g/j/personne de protéines en OCDE (dont 60% d'origine animale) contre 60 g en SSA (dont 20% animales),
- 165 g/j/personne de lipides (dont 55% d'origine animale) en OCDE contre 48 g en SSA (dont 20% animales).

### *223. Occupation des terres*

L'essentiel de la surface du globe est couvert d'eaux de mers et d'océans, avec une petite partie de profondeur inférieure à 200 mètres où se concentrent les espèces marines et la pêche : les plateaux continentaux, d'une surface globale avoisinant 2,4 milliards d'hectares. Ces plateaux annoncent des continents d'une superficie supérieure à 13 milliards d'hectares. L'usage de cette superficie terrestre n'est pas objet de statistiques précises et concordantes (§ 215, 216), mais avec les données et pays considérés (§ 213), en 2003, près de 30% sont couverts en forêts ( $\approx$  3,9 Gha), plus de 25 % en pâtures ( $\approx$  3,4 Gha), presque 12% en cultures ( $\approx$  1,5 Gha), un peu plus de 3% en eaux douces ( $\approx$  0,4 Gha : lacs, rivières...), le solde s'élevant à 30% ( $\approx$  3,9 Gha) : zones désertiques à différentes altitudes et, dans une moindre mesure, zones artificialisées (résidences, industries, routes...). Entre 1961 et 2003, ce sont les surfaces cultivées qui ont connu le plus fort taux de croissance annuel (+0,29% par an, avec environ +175 Mha sur la période), suivies des surfaces en pâtures (+0,25%, +330 Mha) puis en eaux douces (+0,21%, +35 Mha). Ces croissances de surfaces se sont effectuées d'abord au détriment des forêts (-0,23% par an) avec approximativement 400 Mha perdus en 43 ans (Annexe 6). A l'échelle des régions du MEA, l'extension des surfaces cultivées (Figure 13) a été particulièrement prononcée en LAM (+1,13% par an), SSA (+0,81%) et ASIE (+0,54%), les deux premières zones n'exploitant pas 20% de leur potentiel cultivable (Annexe 7) alors que ce taux dépasse 80% en ASIE depuis 1985 (100% en MENA depuis 1990) (Figure 14). En OCDE et surtout FSU, les surfaces cultivées ont diminué au contraire (de respectivement, -0,06% et -0,41% par an). Avec une diminution conjointe du nombre d'actifs agricoles, la surface cultivée par actif dépasse 10 ha en FSU et approche 20 ha en OCDE (2003), alors qu'elle est inférieure à 4 ha ailleurs, voire 0,5 ha en ASIE (Figure 15).

Figure 13. Surfaces agricoles cultivées (1961-2003)

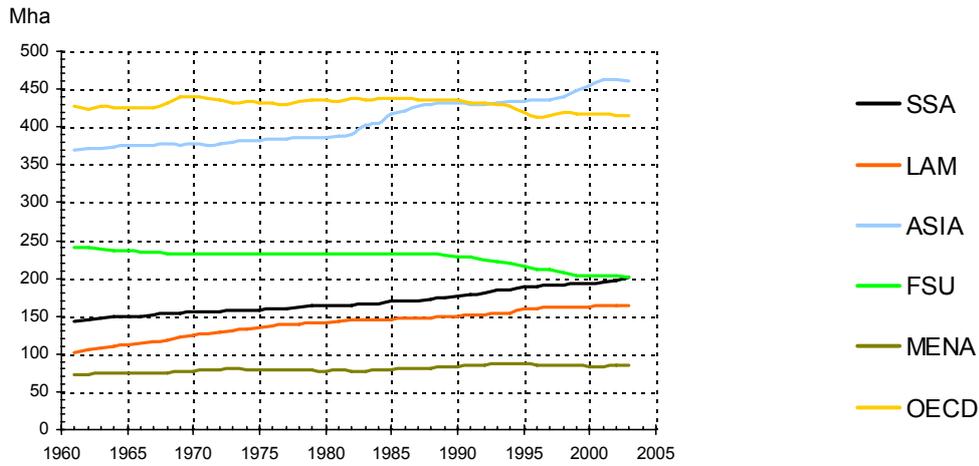


Figure 14. Taux de mise en culture des surfaces potentiellement cultivables (1961-2003)

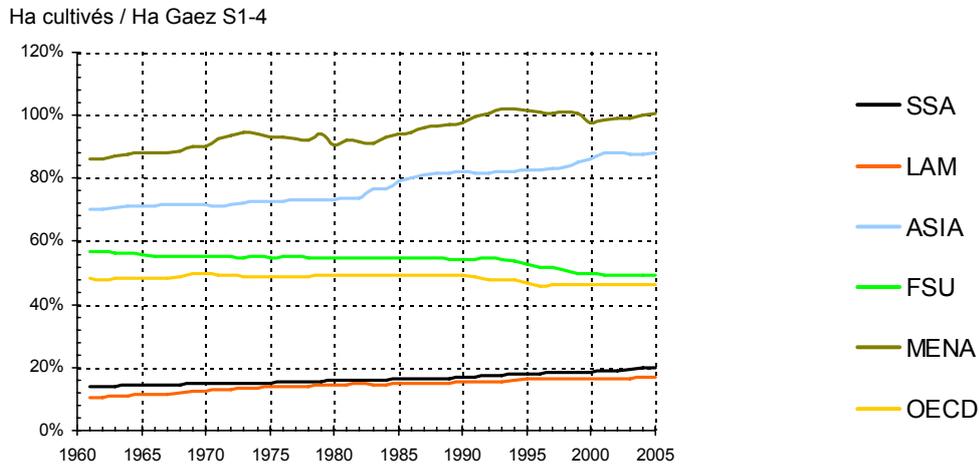
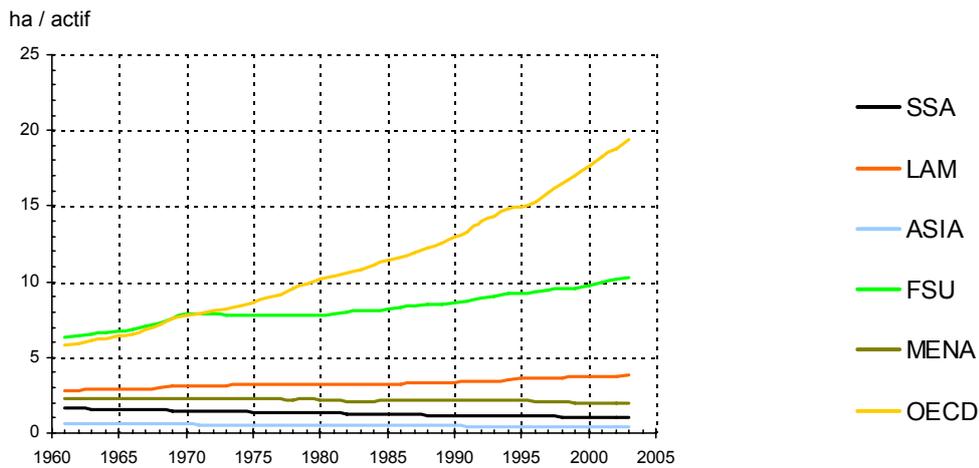


Figure 15. Surface agricole cultivée par actif agricole (1961-2003)



## 224. Productions et productivités alimentaires

Selon nos estimations avec les données à disposition (§ 217), la production mondiale brute<sup>64</sup> de produits alimentaires avoisine 33 200 Gkcal/j en 2003, avec 62% de cette énergie venant de glucides ( $\approx$  1883 Mt en 2003), 24% de lipides ( $\approx$  322 Mt) et 14% de protéines ( $\approx$  420 Mt). Entre 1961 et 2003, cette production calorique a été multipliée par 2,5<sup>65</sup> (Annexe 8) sans bouleversement significatif dans la part d'origine végétale, animale ou aquatique de ces calories. Le rang des régions productrices a par contre changé en quatre décennies. Durant les années 1980, pour les productions végétales, l'ASIE devient première productrice mondiale au lieu d'OCDE (qui demeure par contre première productrice de produits animaux), et LAM arrive troisième à la place de FSU dont la production alimentaire avoisine désormais celle de SSA (Figure 16). Ces augmentations de production sont liées à une extension des surfaces cultivées (§ 223), mais aussi – et avec plus d'importance – à une augmentation des calories alimentaires extraites par hectare cultivé. A l'échelle mondiale, cette production par hectare cultivé (en cultures alimentaires ou non) a été multipliée par plus de 2,2 entre 1961 et 2003, passant de 8 610 à 19 190 kcal/ha/j (9 à 21 quintaux/an en équivalent blé), niveaux qui demeurent plus de 100 fois supérieurs à ceux des espaces aquatiques qui se sont globalement pas « cultivés » par l'homme (Annexe 9). Cette croissance de la production alimentaire terrestre par hectare cultivé s'explique principalement par des croissances de rendements<sup>66</sup> par récolte et par année (multiplication du nombre de récoltes par an), croissances permises par des facteurs de production apportés en plus grande quantité et/ou mieux combinés ou maîtrisés (eau, engrais, semences, lutte contre les ravageurs, mécanisation, etc.). C'est aujourd'hui en ASIE que la production de calories alimentaires par hectare cultivé est, en moyenne régionale, la plus élevée au monde (plus de 25 000 kcal/ha/j). C'est là aussi qu'elle a le plus fortement progressé entre 1961 et 2003 (+2,35% par an) après MENA (+2,7%), et avant LAM (+2,25%), OCDE (+1,7%), SSA (+1,55%) et FSU (+0,5%) (Figure 17). En OCDE, la croissance de la production alimentaire par hectare cultivé s'est accompagnée d'une multiplication par près de 7 de la production alimentaire par actif (presque 425 000 kcal/j en moyenne régionale 2003, contre moins de 90 000 pour les autres régions : Figure 18), envolée permise par la poursuite de l'exode agricole (Figure 10), l'extension des surfaces cultivées par actif (Figure 15), et une très importante motorisation (tracteurs, moissonneuses, etc.) substituant des forces de travail humaines et animales.

---

<sup>64</sup> Produits végétaux, animaux et aquatiques confondus ; certains servant à la production des autres (concentrés végétaux pour animaux par exemple), une telle addition de produits demeure délicate, tout comme l'établissement d'une comptabilité nette.

<sup>65</sup> Par 2,3 pour les glucides, 2,7 pour les protéines et 3,0 pour les lipides.

<sup>66</sup> Plutôt que par une croissance – au sein des espaces cultivés – des surfaces de productions alimentaires au détriment des surfaces de productions non-alimentaires (fibres, caoutchouc, tabac... cultures fourragères)

Figure 16. Productions alimentaires végétales (1961-2003)

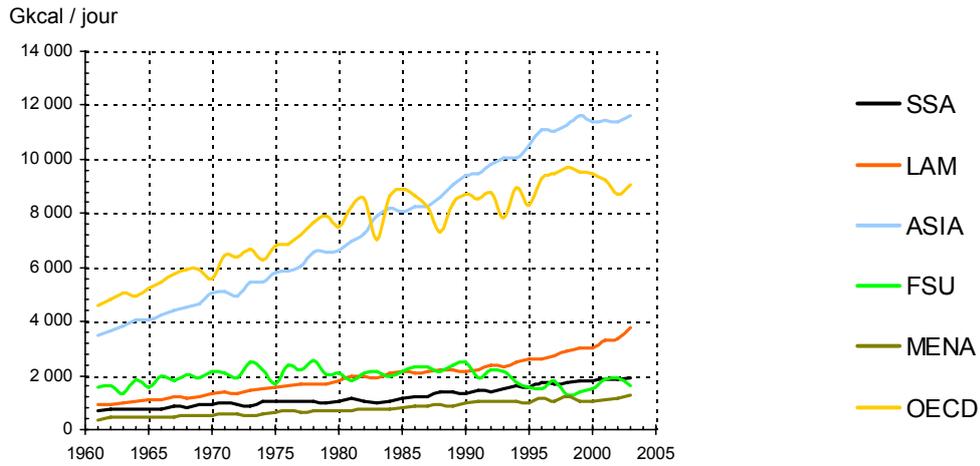


Figure 17. Productions alimentaires végétales par hectare agricole cultivé (1961-2003)

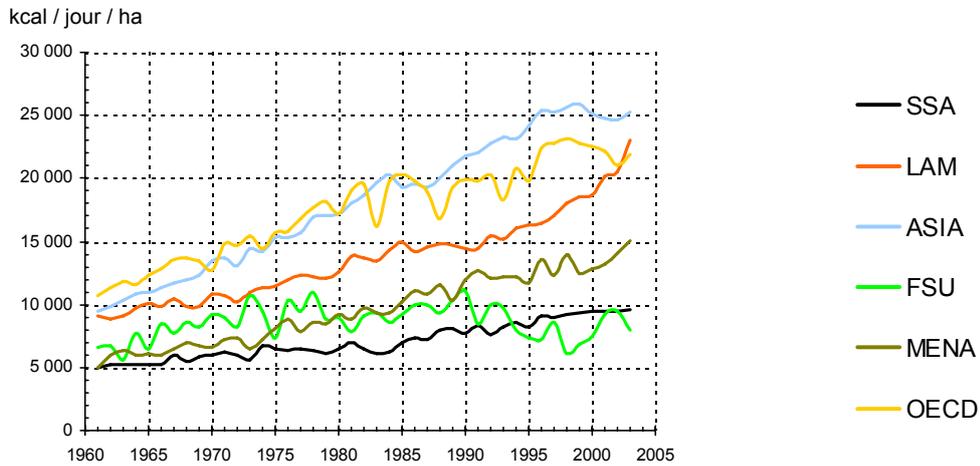
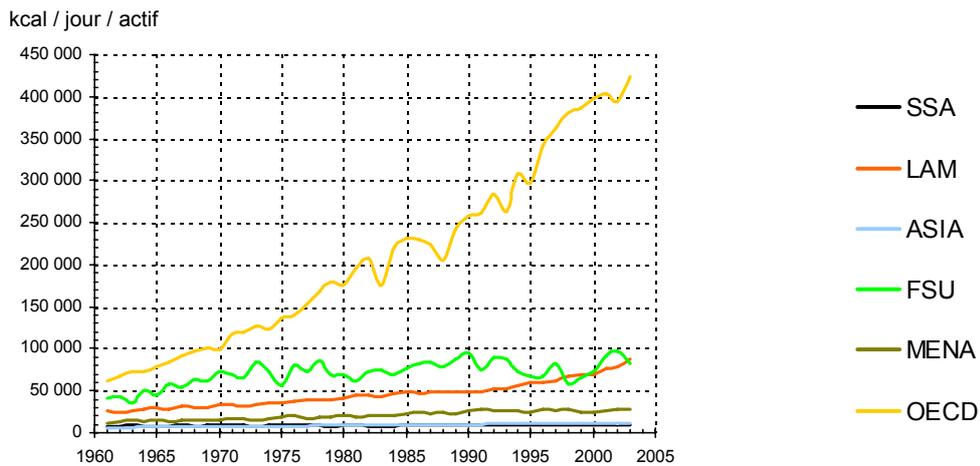


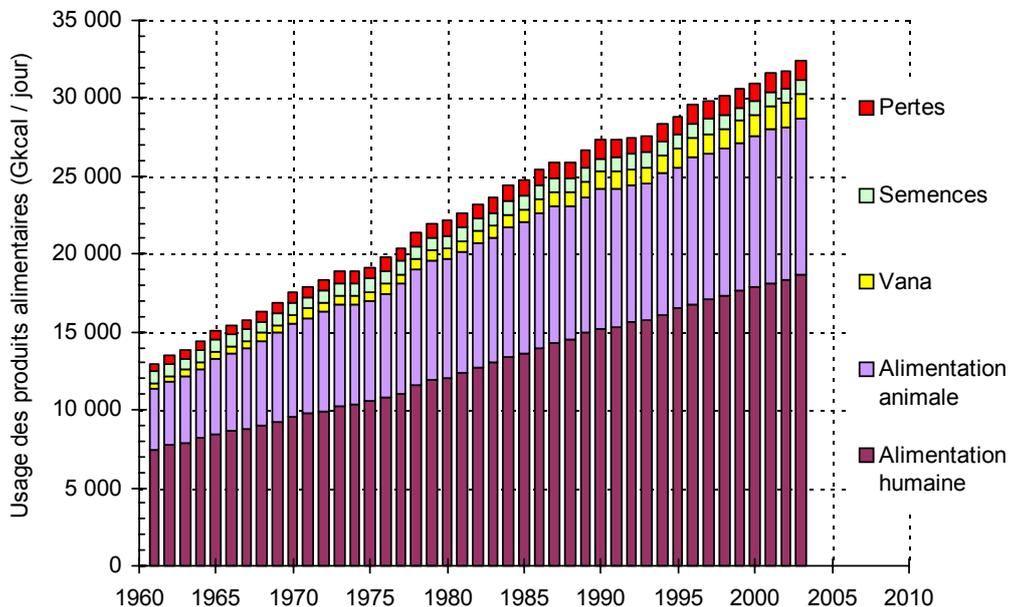
Figure 18. Productions alimentaires végétales par actif agricole (1961-2003)



## 225. Usages des produits alimentaires

La consommation mondiale brute<sup>67</sup> de calories alimentaires avoisine 33 000 Gkcal/j en 2003, l'équivalent du montant de leur production (§ 224) aux imperfections statistiques et variations de stock près (§ 217). Comme pour les productions, plus de 88% de ce montant provient de produits végétaux, près de 11% de produits animaux (terrestres) et moins de 1% de produits aquatiques (essentiellement animaux). Ces calories sont orientées vers divers usages après qu'une partie soit perdue entre la production et la mise à disposition aux unités économiques ( $\approx 4\%$  en 2003) (Figure 19). Parmi ces usages figurent les semences et autres formes destinées à la reproduction des productions ( $\approx 3\%$ ), ainsi que des valorisations agricoles non-alimentaires ( $\approx 5\%$  : lubrifiants, cosmétique, biocarburants...). L'essentiel demeure cependant utilisé pour alimenter les hommes et les animaux, dans des proportions très variables selon les régions pour les produits végétaux (Annexe 10, Planche A). Ainsi, en SSA et ASIA, plus 70% des disponibilités végétales de 2003 servent à l'alimentation directe des hommes, alors que ce taux tombe à moins de 35% en OCDE, région qui consacre depuis longtemps à l'alimentation des animaux plus de 55% de ces disponibilités. Cette part des calories végétales alimentaires orientée vers l'alimentation des animaux tend à augmenter depuis le début des années 1960 en LAM, MENA et ASIA où elle est se situe désormais entre 20 et 40% (Annexe 10, Planche B), suivant des modalités par ailleurs modélisées (§ 219). La part des calories végétales alimentaires orientée en VANA tend également à augmenter dans la plupart des régions, plus particulièrement depuis les années 1990, notamment en LAM et OCDE où elle dépasse désormais plus de 5%.

Figure 19. Usages mondiaux des produits alimentaires (1961-2003)



<sup>67</sup> Produits végétaux, animaux et aquatiques confondus ; certains servant à la production des autres (concentrés végétaux pour animaux par exemple), une telle addition de produits demeure délicate, tout comme l'établissement d'une comptabilité nette.

## 226. Commerce alimentaire

En quatre décennies, le commerce mondial de produits alimentaires s'est fortement développé puisque les échanges dépassent 7000 Gkcal/jour en 2003 (92% issues de végétaux, 6% d'animaux terrestres, 2% de milieux aquatiques) contre moins de 1500 en 1961. Ces ordres de grandeurs témoignent d'une dépendance accrue des nations au commerce international, avec une croissance parallèle des transports à base d'énergies fossiles. Durant la période, le sens du commerce international de calories alimentaires a également beaucoup évolué. L'observation des soldes nets d'échanges par région MEA (Exports totaux – Imports totaux, § 217) (Figure 20), et la mise en rapport de ces soldes avec les consommations régionales (Figure 21, Annexe 11), permettent de conclure sur au moins 5 points :

- (1) la zone OCDE, grande consommatrice de calories alimentaires, est aussi devenue une importante exportatrice de calories alimentaires, végétales et animales ;
- (2) l'Amérique latine (LAM), traditionnellement exportatrice nette de calories alimentaires (produits oléagineux et sucriers avant tout), a conforté sa position alors qu'elle augmentait parallèlement la disponibilité calorique moyenne par habitant ;
- (3) l'Asie conserve une relative indépendance en calories alimentaires (équilibre entre les exports et les imports) alors que la disponibilité régionale par personne a également augmenté, et que l'effectif des personnes est passé de 1,5 à près de 3,4 milliards d'individus entre 1961 et 2003 ;
- (4) les recettes d'exportations de la région MENA permettent à cette dernière d'importer et consommer une quantité croissante de calories alimentaires, y compris pour nourrir et élever localement des animaux ;
- (5) en Afrique Subsaharienne (SSA), les productions locales et les quantités nettes importées, bien que croissantes, n'ont pas été suffisamment élevées pour augmenter sensiblement la disponibilité calorique par personne qui demeure la plus basse au monde (Figure 11).

Figure 20. Solde Exports-Imports de produits alimentaires (1961-2003)

Gkcal / jour

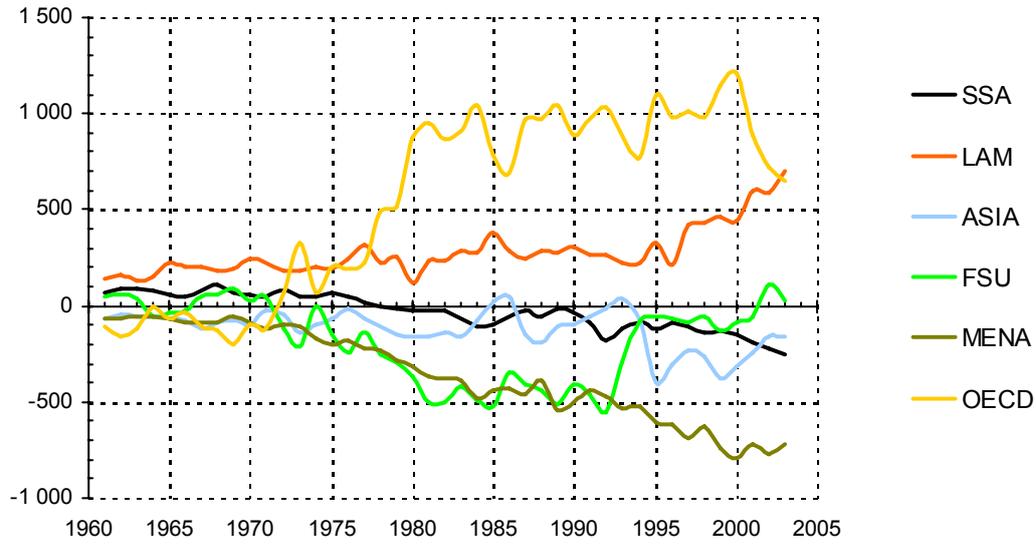
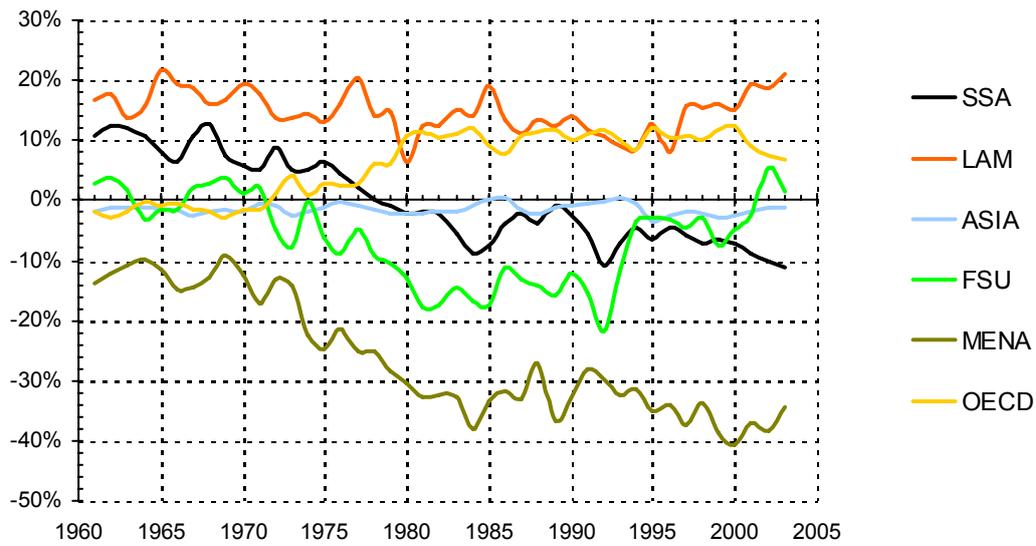


Figure 21. Solde Exports-Imports (kcal) / Usages (kcal) de produits alimentaires (1961-2003)



## 23. Prospectives 2050

Après avoir utilisé Agribiom pour procéder à une vaste rétrospective mondiale de l'évolution 1961-2003 des composantes et bilans emplois-ressources de biomasses alimentaires par grandes régions MEA (§ 22), ce troisième chapitre utilise le même outil pour une prospective de ces bilans à l'horizon 2050. Cette prospective se décline en deux scénarios (avec chacun deux variantes) : ceux travaillés dans le cadre de la prospective « Agrimonde : Agricultures et alimentations du monde en 2050 » initiée en 2006 par l'Inra et le Cirad. Cet exercice a conduit, dans sa première phase (2006-08), à des réunions quasi mensuelles d'une vingtaine d'experts français de divers horizons : le GAA (Groupe d'Appui Agrimonde). La description et le débat des scénarios analysés ou imaginés par le GAA sont l'objet d'un rapport détaillé (INRA et CIRAD, 2009)<sup>68</sup>. Ici, avant de présenter les principales hypothèses et résultats quantifiés auxquels est parvenu le collectif en mobilisant notre plateforme dans son état de développement 2008 (pas de simulation des consommations induites en eau et énergies fossiles, des émissions/stockages de GES...)<sup>69</sup>, puis commenter rapidement ces résultats notamment en équivalent hectares de terres, nous commençons par exposer les grands principes des deux scénarios (§ 231), puis des « règles de bouclages » qui nous ont conduit à exposer deux variantes<sup>70</sup> de simulation quantitative pour chacun d'eux (§ 232).

### 231. Des principes de scénarios

#### 2311. L'Orchestration globale (scénario AGO)

Le premier scénario, ici baptisé « AGO », peut être qualifié de « tendanciel » dans la mesure où il s'appuie sur une vision du monde et des orientations politiques qui paraissent aujourd'hui dominer sur la scène internationale. Ce scénario est une traduction d'un des quatre scénarios du *Millennium Ecosystem Assessment* (MEA, 2005), le scénario « *Global Orchestration* » (GO) qui dépeint une société mondialement connectée dans laquelle la croissance économique prime<sup>71</sup>. La mondialisation règne ici en maître et s'épanouit dans tous les domaines ; elle rime avec croissance économique et croissance du commerce international, qui ne connaît plus l'entrave des frontières. Dans ce monde caractérisé par la libéralisation du commerce, les pays coopèrent aisément, afin d'améliorer le bien-être social et économique de toutes les populations, mais aussi de protéger et de mettre en valeur les services et les biens publics mondiaux (éducation, santé, infrastructures, technologies...). Les conditions sont remplies pour que les problèmes environnementaux, tels que le changement climatique et la pêche, soient traités au niveau mondial, grâce à la coopération internationale. Mais comme le souci de l'environnement passe en second, après d'autres priorités – croissance économique et sociale, amélioration du bien-être matériel des hommes – les problèmes environnementaux qui menacent le bien-être humain (pollution, érosion, changement climatique) ne sont pris en considération que lorsqu'ils deviennent manifestes. Comme les institutions internationales ont une approche réactive de la gestion des écosystèmes, elles sont prises au dépourvu par les événements survenant en raison d'interventions différées ou par des changements régionaux imprévus. Beaucoup sont convaincus que la connaissance et la technologie nécessaires pour

<sup>68</sup> Pour le récit des scénarios, voir Chaumet, Paillard et Treyer, in INRA-CIRAD (2009: 129-45)

<sup>69</sup> Cf. § 211

<sup>70</sup> Bien d'autres variantes d'un même scénario auraient pu être testées, pour évaluer différentes façons d'atteindre l'équilibre global, ou pour révéler la sensibilité des résultats à chaque hypothèse (stratégies commerciales, populations, alimentations humaines et animales, etc.)

<sup>71</sup> les 3 autres scénarios du MEA sont AM (*Adapting mosaic*), OS (*Order from strength*) et TG (*Techno garden*)

faire face aux enjeux environnementaux se développeront ou pourront être développés si nécessaire, comme cela le fut dans le passé. Ce scénario met en lumière les risques de “surprises” écologiques, dans un tel contexte, comme par exemple, l’émergence de maladies infectieuses. Ce scénario qui, des quatre scénarios du MEA, se caractérise à la fois, par le plus faible accroissement de la population mondiale et la plus forte croissance économique, ainsi que le plus fort taux de développement technologique, présenterait aussi la plus forte progression des revenus et les plus grands progrès en matière d’équité. Mais l’accroissement des richesses augmenterait la demande pour une amélioration de l’environnement.

*2312. La Révolution doublement verte (scénario AG1)*

Le second scénario, ici baptisé « AG1 », est clairement un scénario de rupture. Il s’inspire de la « Révolution Doublement Verte » (R2V) développée par Michel Griffon (2006). Dans cette R2V, le développement est fondé sur l’écologie (comme guide technologique) et l’équité (comme inspiration sociale). Proche du scénario MEA « *Techno Garden* » (TG, « techno-jardin ») en ce qu’il « associe une libéralisation internationale maîtrisée et des technologies nouvelles », le scénario R2V s’en démarque néanmoins, en ce que, cherchant à satisfaire simultanément une condition écologique et une condition socio-économique, il repose sur un choix de technologies que TG laisse dans l’indétermination. Comme dans le MEA, la préoccupation environnementale et la question de la gestion des écosystèmes sont au cœur de l’ouvrage de Michel Griffon, mais l’approche qu’en offre celui-ci s’en distingue en ce qu’elle est centrée sur une double problématique : agriculture et connaissance-science-technologie. Cherchant à concilier une production alimentaire élevée et un développement écologique satisfaisant, le scénario R2V lie de façon indissociable agriculture, technologie, connaissance et recherche. Scénario alternatif, il répond à la nécessité d’inventer une nouvelle agriculture, permettant non seulement de nourrir neuf milliards d’êtres humains, mais aussi de « sortir de la sous-alimentation plus d’un habitant sur sept et [de] promouvoir une agriculture des pauvres dans le respect des lois de la nature ». La nouvelle technologie sur laquelle repose cette nouvelle agriculture vise à assurer le respect de l’environnement et une gestion durable des ressources naturelles. Elle se fonde sur l’écologie scientifique, ou « intensification écologique », qui peut incorporer des connaissances scientifiques de pointe (notamment issue de la génomique) avec des savoirs accumulés et utilisés localement par les producteurs agricoles. La pluralité et la diversité des connaissances nécessaires implique ainsi une nouvelle conception de la recherche et de la diffusion de la technologie qui ne peut se faire sans, et encore moins contre, les agriculteurs pauvres des pays en développement. Une volonté politique de mettre en œuvre l’ensemble des conditions économiques et sociales nécessaires au déploiement de ce changement technologique est donc nécessaire ; les investissements financiers à consentir afin de recapitaliser les écosystèmes seraient inopérants s’ils ne s’accompagnaient d’un traitement de la question sociale. Celui-ci passe par des politiques agricoles spécifiques, visant à réduire les risques et à recapitaliser les agricultures pauvres – non seulement en capital écologique (réhabilitation des écosystèmes), mais aussi en capital économique (achat de terre et de matériel), en capital social (constitution d’organisations agricoles) et en capital humain (formation) – grâce à des financements nationaux et internationaux. Le scénario R2V se présente donc comme un scénario de développement durable aux plans écologique, économique et social, théoriquement étayé sur le concept de « viabilité », et commandé par deux principes : un principe épistémologique et un principe éthico-politique.

### 232. Des principes de bouclage

Avec Agribiom, la construction d'un bilan mondial quantitatif pour chaque scénario suppose de choisir des règles d'équilibrage (de « bouclage ») permettant de déterminer la valeur d'équilibre des variables non fixées par le groupe de prospective (les variables endogènes). Pour la prospective Agrimonde, ces variables endogènes sont les volumes d'échanges interrégionaux ainsi que l'alimentation des animaux et/ou les productions animales, et les variables fixées par le GAA sont la population, la disponibilité alimentaire (en calories), les semences (en % des usages), les pertes (en % des usages), les VANA (en % des usages), et la production végétale (en calories). Nous définissons deux jeux de règles qui permettent le bouclage (2 variantes) et qui jouent un rôle proche de celui joué par les prix dans un modèle d'équilibre économique. Le bilan alimentaire n'est donc pas une simulation économique des offres, demandes et échanges interrégionaux, mais plutôt un test global de cohérence des hypothèses quantitatives faites dans la description des différentes composantes des scénarios. Les deux variantes du bouclage sont ici deux modes de calculs correspondant à deux représentations possibles des échanges de calories.

#### 2321. Préférence pour l'importation de calories végétales (simulations AGO\_1 et AG1\_1)

Dans cette variante, chaque région considérée produit exactement la quantité de calories animales qu'elle consomme, et elle importe (ou exporte) seulement les calories végétales déficitaires (ou excédentaires) pour couvrir tous ses besoins (y compris pour l'alimentation animale). Les productions animales sont fixées par une règle : la production en produits animaux (alimentaires...) de chaque région correspondant exactement à ses besoins en produits animaux. L'alimentation des animaux est déduite grâce aux fonctions de production. Le solde des échanges est déduit de l'équilibre régional ressources-emploi.

L'intérêt de cette variante est d'illustrer un solde régional de manière synthétique, en une seule unité (les calories végétales) : ce qu'une région doit importer pour nourrir les hommes en produits végétaux et animaux, ou ce qu'elle peut exporter après avoir couvert les besoins de sa population en produits végétaux et animaux.

Les étapes dans l'élaboration du bilan sont les suivantes :

##### - Etape 0 : Calcul des productions végétales

La production végétale est donnée par le produit de la surface cultivée alimentaire (i.e. surface cultivée – SCNA : hypothèses GAA) et du rendement moyen de cette surface en calories alimentaires (hypothèse GAA).

##### - Etape 1 : Calcul des besoins

Les besoins en calories végétales liés à l'alimentation des animaux sont calculés de façon que la production de calories animales de la région soit égale aux besoins en calories animales de cette région. On utilise les fonctions de production pour trouver par tâtonnement la quantité d'alimentation du bétail qui permette de produire la production animale visée (hypothèse GAA) étant donné la surface en pâture (hypothèse GAA)<sup>72</sup>.

---

<sup>72</sup> Comme d'autres paramètres des scénarios, il serait utile que la surface de pâture soit endogène et non fixée une fois pour toutes dans le scénario. En effet, selon la variante utilisée, la production animale par région varie très sensiblement et la surface de pâture ne varie pas. La substitution entre les calories de concentrés et cette

Tous les autres besoins en calories végétales et animales sont fixés par hypothèse du GAA.

- Etape 2 : Equilibrage des bilans régionaux par les échanges

Pour les calories végétales, deux cas peuvent se produire. Dans le premier cas, la production de la région ne couvre pas la totalité de ses besoins : la région importe alors les quantités correspondant à la différence entre tous ses besoins (définis ci-dessus) et la production végétale de la région. Dans le second cas où la production de la région couvre ses besoins, cette dernière exporte alors les calories correspondant à la différence entre sa production végétale et ses besoins

Pour les calories animales, l'équilibre des calories est assurée à l'étape 1. Chaque région produit exactement les calories animales qu'elle utilise.

- Etape 3 : Equilibrage global

Le solde mondial des échanges permet de vérifier si le total des emplois est compatible avec le total des ressources. Si les besoins et les ressources de chaque région sont équilibrés après échange, cela conduit à un bilan global équilibré : les hypothèses quantitatives du scénario sont compatibles entre elle, et la quantité totale de calories exportables est égale aux besoins totaux d'importations. Dans le cas contraire, le solde mondial peut être interprété par le groupe (le scénario est excédentaire ou déficitaire), ou bien les hypothèses revistées pour aboutir à un équilibre global entre emplois et ressources.

*2322. Préférence pour l'importation de calories animales (simulations AGO\_2 et AG1\_2)*

Cette variante suppose que les régions déficitaires importent des calories végétales pour couvrir les besoins humains en calories végétales, et des calories animales pour couvrir les besoins humains en calories animales. En d'autres termes, il n'y a pas d'échanges d'aliments pour animaux. Dans cette variante, l'alimentation des animaux est fixée par une règle : c'est ce qu'il reste de la production végétale de la région après couverture des besoins alimentaires humains, pertes, VANA et semences. La production animale est donnée par les fonctions de production. Le solde des échanges est déduit de l'équilibre régional ressources-emplois (calories végétales pour compléter éventuellement les usages humains et calories animales pour compléter les usages humains).

Les étapes dans l'élaboration du bilan sont les suivantes :

- Etape 0 : Calcul des productions végétales

La production végétale est donnée par le produit de la surface cultivée alimentaire (i.e. surface cultivée – SCNA : hypothèses GAA) et du rendement moyen de cette surface en calories alimentaires (hypothèse GAA).

- Etape 1 : Calcul des besoins en calories

Les besoins en calories végétales et animales sont tous fixés par hypothèse (GAA) sauf les besoins en calories végétales pour l'alimentation animale qui ne sont pas fixés à ce stade

- Etape 2 : Equilibrage des bilans régionaux par les échanges

Trois cas peuvent se produire : (i) Quand la production végétale de la région ne couvre pas les besoins de l'alimentation humaine en calories végétales, la région importe les calories

---

surface de pâture est supposée fixe, alors qu'on peut penser qu'elle est en réalité variable lorsque la surface de pâture devient très faible et la production animale est très élevée, ou l'inverse.

végétales correspondant aux besoins humains (tous usages sauf alimentation animale). La production animale est alors calculée par les fonctions de production en utilisant uniquement les surfaces en pâtures (hypothèse GAA), et la région importe les calories animales manquantes pour satisfaire les besoins non couverts dans ce domaine. (ii) Quand la production végétale régionale couvre les besoins humains en calories végétales mais pas les besoins de l'alimentation animale (permettant de couvrir les besoins humains de la région en calories animales), la région importe alors les calories animales nécessaires pour couvrir ses besoins. (iii) Enfin, quand la production végétale régionale suffit pour couvrir les besoins humains en calories végétales et les besoins de l'alimentation animale (permettant de couvrir les besoins humains de la région en calories animales), alors la région exporte (à part égale de toutes les régions dans ce cas) les calories végétales nécessaires pour satisfaire les besoins des régions importatrices de calories végétales, et utilise tout le reste pour sa production animale (que l'on recalcule alors). L'excédent de production animale est exportable.

### - Etape 3 : Equilibre global

Le solde mondial des échanges permet de vérifier si le total des emplois est compatible avec le total des ressources. Si les besoins et les ressources de chaque région sont équilibrés après échange, cela conduit à un bilan global équilibré : les hypothèses quantitatives du scénario sont compatibles entre elle, et la quantité totale de calories exportables est égale aux besoins totaux d'importations. Dans le cas contraire, le solde mondial peut être interprété par le groupe (le scénario est excédentaire ou déficitaire), ou bien les hypothèses revistées pour aboutir à un équilibre global entre emplois et ressources.

#### 233. La situation de référence 2003

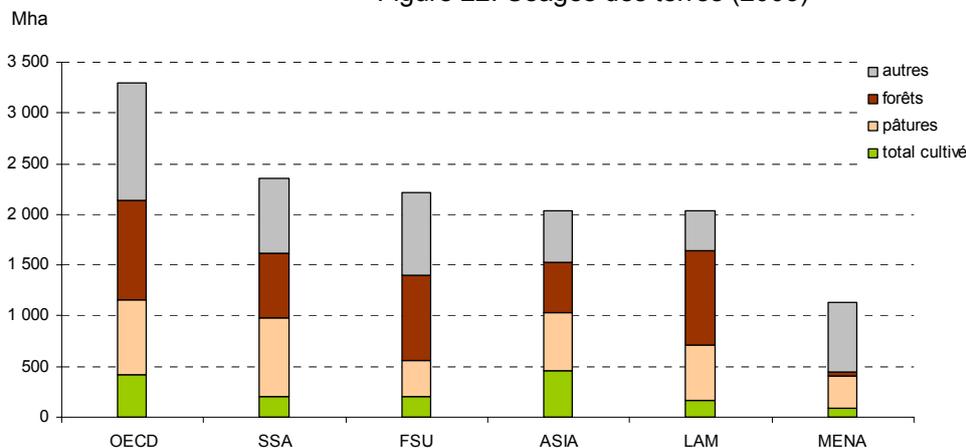
Les résultats de simulations effectuées pour les scénarios prospectifs peuvent être comparés à une situation dite « de référence », ici l'année 2003, dont l'équilibre Emplois-Ressources de biomasses alimentaires est synthétisé dans le Tableau 11. Les chiffres de ce tableau ne sont donc pas des simulations mais simplement la traduction en calories de la situation réellement observée en 2003 après des ajustements précédemment exposés (Cf. le « résidu », § 217). Cet équilibre emplois-ressource en calories alimentaires fait apparaître un solde régional des échanges relativement faible par rapport au total régional des usages de calories, sauf en MENA où le solde net des exports-imports représente 36 % des usages de calories végétales de la région et 19% des usages de calories animales.

Tableau 11. Equilibre Emplois-Ressources par région MEA (2003)

	(Gkcal / jour)	Productions	Usages	Solde Exp-Import
OECD	Végétaux	9 109	8 669	440
	Animaux	1 535	1 408	127
SSA	Végétaux	1 938	2 191	-253
	Animaux	90	105	-15
FSU	Végétaux	1 619	1 579	40
	Animaux	219	241	-23
ASIA	Végétaux	11 647	11 807	-160
	Animaux	1 243	1 287	-44
LAM	Végétaux	3 766	3 109	657
	Animaux	372	390	-18
MENA	Végétaux	1 262	1 986	-724
	Animaux	121	148	-28
Monde	Végétaux	29 341	29 341	0
	Animaux	3 580	3 580	0

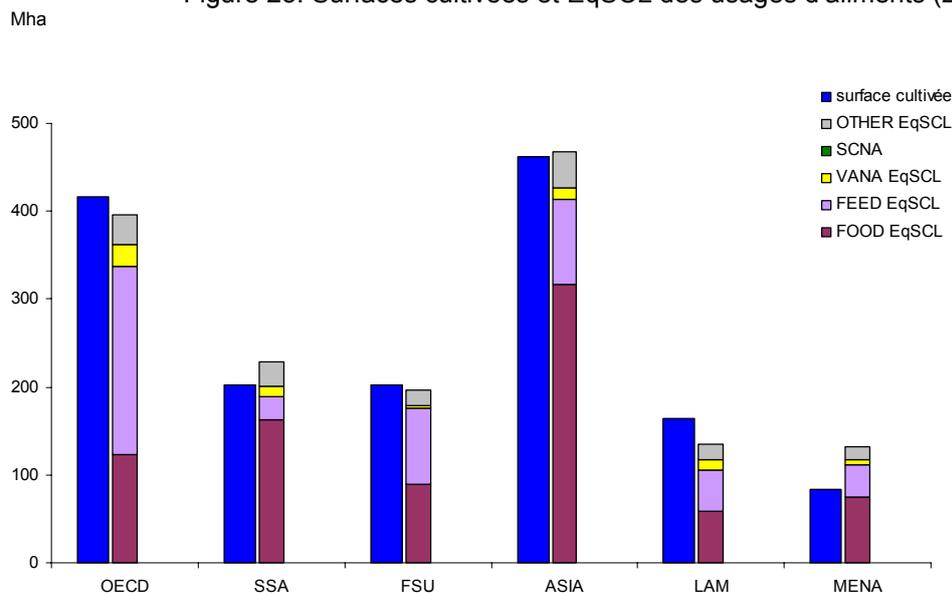
Aux productions régionales correspond en 2003 un usage des sols (Figure 22, Figure 13 et Annexe 6 pour évolution 1961-2003) dans lequel les terres cultivées (cultures annuelles et pérennes) représentent 12% de la surface terrestre au niveau mondial, et les terres agricoles (terres cultivées + pâtures) 37%.

Figure 22. Usages des terres (2003)



Les usages de calories alimentaires végétales peuvent de leur côté être convertis en équivalent surface cultivée localement (EqSCL) en divisant les quantités régionales d'usage de ces calories végétales (Gkcal) par le rendement régional moyen en calories alimentaires végétales des surfaces cultivées localement (kcal/ha : cf. Figure 17 et Annexe 8). La comparaison de ces EqSCL (auxquelles peuvent être ajoutées les SCNA)<sup>73</sup> avec les surfaces réellement cultivées (SCA + SCNA) permet d'évaluer quels sont, aux niveaux locaux de productivité considérés, les excédents ou déficits locaux de terres avant les exports-imports (Figure 23). L'exercice permet aussi ici de montrer la plus ou grande importance des VANA (qui incluent les biocarburants) : 7% du total des terres cultivées en Amérique latine ainsi qu'en Afrique du Nord et Moyen Orient, 6% en OCDE et en Afrique, 3% en Asie et 2% en ex-URSS.

Figure 23. Surfaces cultivées et EqSCL des usages d'aliments (2003)



<sup>73</sup> Surfaces cultivées non-alimentaires, considérées comme négligeables en 2003 : cf. note 32 page 35

## 234. Simulations du scénario Agrimonde AGO

### 2341. Hypothèses quantitatives

Pour ce scénario « *Global Orchestration* » comme pour les trois autres scénarios du MEA, ce dernier a procédé à des simulations quantitatives en couplant divers hypothèses et modèles suivant des modalités qu'il n'a pas été possible de connaître, mais qui ont conduit à des résultats chiffrés qui nous ont été pour partie communiqués. Ces résultats étant très souvent exprimés suivant des unités et des catégories (de produits, de surfaces, ...) différentes d'Agribiom, un travail préalable de traduction des grandeurs MEA en grandeurs Agribiom a été nécessaire<sup>74</sup>. A titre d'exemple, les taux régionaux de croissance des rendements en céréales tels qu'affichés par le MEA pour le scénario GO ont été utilisés pour extrapoler les rendements régionaux Agribiom en kcal/ha pour 2050 pour ce scénario. Faute de données suffisantes, certaines variables Agribiom ont dû être renseignées en essayant de traduire au mieux les grands principes du scénario (§ 2311). Quant aux volumes de productions animales, n'étant pas renseignés dans les sorties MEA, nous les avons estimés en calories via nos fonctions de production (§ 219) et des hypothèses que ces dernières nécessitent, notamment sur les volumes d'aliments pour animaux (FEED). Enfin, les projections de populations humaines ne sont pas celles (particulièrement basses) du MEA pour ce scénario, mais celles des Nations-Unis (variante moyenne) comme dans AG1. L'essentiel des hypothèses adoptées pour ce scénario AGO sont résumées dans le Tableau 12, et développées en Annexe 13 avec nos résultats de simulations suivant les deux variantes de bouclage présentées ci-après.

Tableau 12. Principales hypothèses de simulation AGO

Horizon	2050
Populations	Variante moyenne des projections nationales des Nations Unies (estimations 2007) : ~ 9 Ghab (+42% par rapport à 2003)
Rations (kcal/hab/j)	Les calories alimentaires disponibles pour l'alimentation suivent les évolutions relativement « tendanciennes » 1961-2003, qui conservent les inégalités observées au 20ème Siècle et la progression des consommations de produits animaux dans les rations
Usages (Gkcal/j)	- Alimentation animale : Feed végétal : variable endogène (déterminée par le bouclage selon la variante utilisée) Feed animal : pourcentage des usages totaux en 2000. - Vana : pourcentage des usages totaux de 2000 [nb : moyenne mondiale 2003 = 5%] - Pertes : pourcentage des usages totaux de 2000 [nb : moyenne mondiale 2003 = 4%] - Semences : pourcentage des usages totaux de 2000 [nb : moyenne mondiale 2003 = 3%] - Usages non répertoriés : valeur du « résidu » 2003 [nb : 777 Gkcal/j pour végétaux]
Surfaces (ha)	SCA : poursuite (relative...) des augmentations 1961-2003 SCNA : forte croissance entre 2003 et 2050. Pâtures : poursuite des tendances régionales 1961-2003 Forêts : poursuite des tendances régionales 1961-2003
Rendements (kcal/ha/j)	Calories alimentaires végétales terrestres : poursuite (relative...) des augmentations 1961-2003 Calories alimentaires aquatiques (eaux douces, marines) : adaptation des rendements pour couvrir les niveaux d'usages régionaux
Productions animales (Gkcal/j)	Variable endogène (déterminée par le bouclage selon la variante utilisée) Modèle choisi pour simuler les productions animales : - Fonctions de production distinguant les produits de ruminants des produits de monogastriques - Famille MEA_6103 : fonctions régionales (régions MEA) établies à partir des données nationales 1961-2003 - Série M080615 : fonctions linéaires à deux facteurs, les concentrés d'origine terrestre (calories alimentaires végétales et animales) et les surfaces en pâture (ha), et un terme de substitution (la production de calories de ruminants dans la fonction de produits monogastriques, et vice-versa) - Unité du modèle : protéines en équivalent calories, la conversion des calories de protéines en calories totales étant ensuite effectuée selon les ratios régionaux 2003 - Résolution simultanée des deux fonctions sans contrainte de rapport de production entre ruminants et monogastriques
Import-Export (Gkcal/j)	Variante 1 : préférence politique des régions déficitaires pour l'autosuffisance en calories animales (importation de calories végétales seulement) Variante 2 : préférence politique des régions déficitaires pour l'autosuffisance en calories végétales ; les régions déficitaires s'approvisionnent en quantités égales dans les régions excédentaires

<sup>74</sup> Travail réalisé par la cellule prospective de l'Inra (Paris), en particulier J.M. Chaumet.

2342. Variante 1 (AGO\_1)

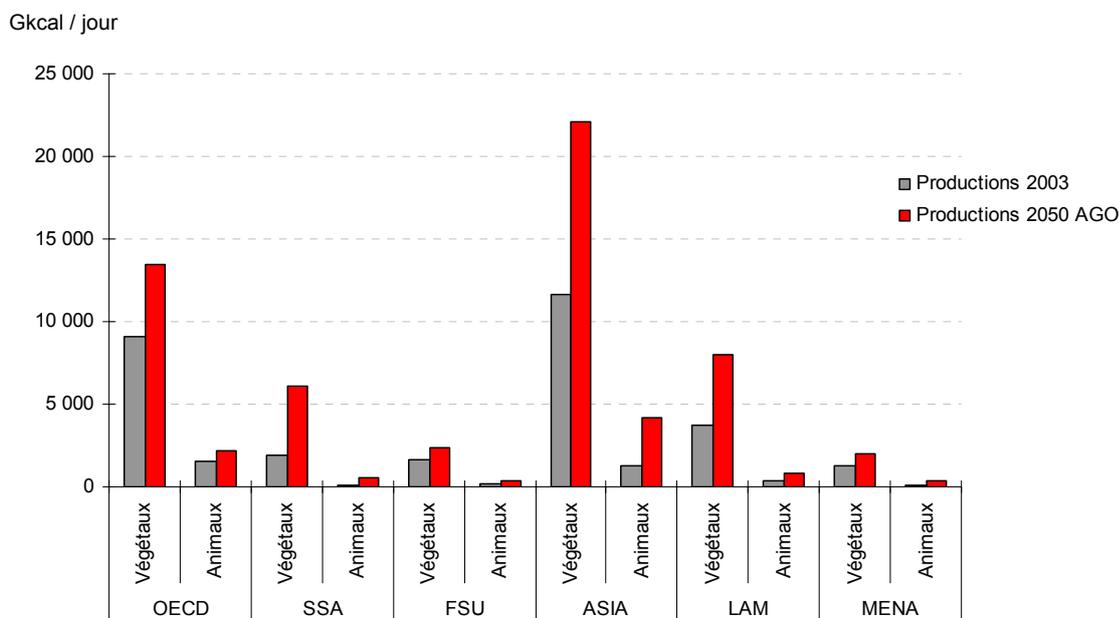
Dans cette variante de « préférence pour l'importation de calories végétales » codée « AGO\_1 » (§ 2321), chaque région produit la quantité de calories animales qu'elle consomme, et importe ou exporte les calories végétales excédentaires ou déficitaires pour parvenir à l'équilibre des calories animales. La simulation de cette variante fait apparaître un solde mondial positif en calories végétales (Tableau 13) : malgré la traduction des résultats du scénario « Orchestration Globale » du MEA en langage et méthode Agribiom, on obtient un solde emplois-ressources relativement peu déséquilibré à l'échelle mondiale.

Tableau 13. Résultats agrégés de la simulation AGO\_1

	(Gkcal / jour)	Productions	Usages	Solde Exp-Import
OECD	Végétaux	13 436	10 939	2 497
	Animaux	2 158	2 158	0
SSA	Végétaux	6 084	7 378	-1 294
	Animaux	528	528	0
FSU	Végétaux	2 398	2 118	280
	Animaux	363	363	0
ASIA	Végétaux	22 094	23 009	-915
	Animaux	4 189	4 189	0
LAM	Végétaux	7 992	5 930	2 062
	Animaux	834	834	0
MENA	Végétaux	1 985	4 175	-2 190
	Animaux	335	335	0
Monde	Végétaux	53 990	53 550	440
	Animaux	8 407	8 407	0

Par rapport à la situation de référence (2003), cette simulation fait apparaître un quasi doublement de la production mondiale (+84% en calories végétales, +137% en calories animales) répartie entre régions comme indiqué dans la Figure 24.

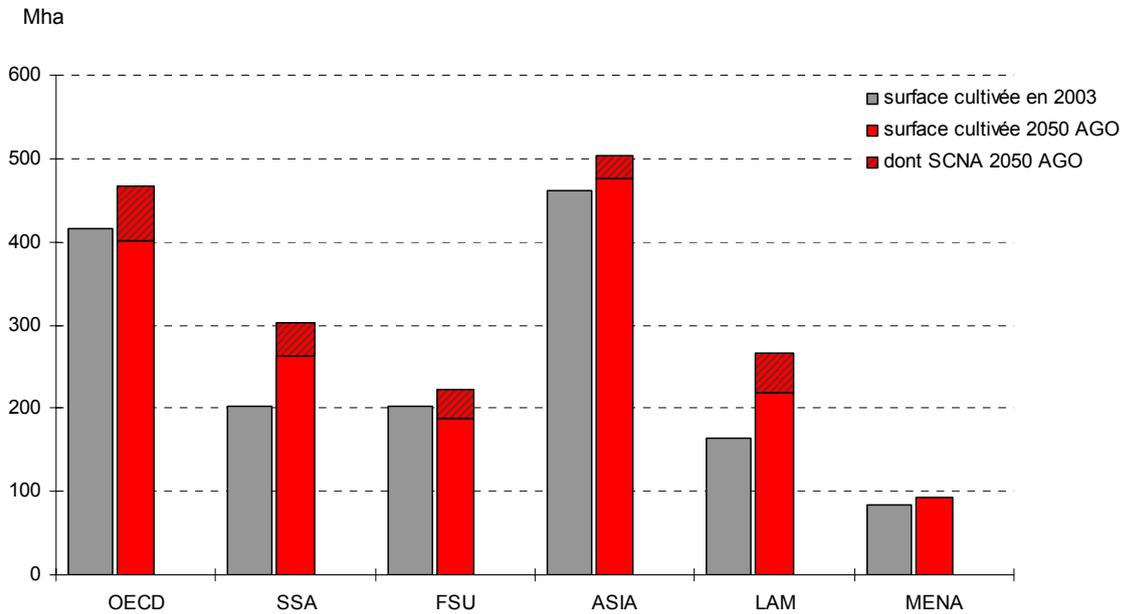
Figure 24. Evolution des productions alimentaires, Scénario AGO (2003 & 2050)



En revanche, cette forte progression de la production ne repose pas sur un accroissement important des surfaces cultivées (Figure 25) puisque d'importantes progressions de rendements sont ici envisagées. Dans ce scénario, le changement d'usage du sol est surtout

influencé par l'accroissement des surfaces de cultures non alimentaires. Ces SCNA représentent en OCDE pratiquement l'ensemble des accroissements de surfaces cultivées. Les VANA ont presque doublé en termes de calories produites, mais ce quasi doublement résulte essentiellement des gains de rendement et non de surface.

Figure 25. Evolution des surfaces cultivées, Scénario AGO (2003 & 2050)



Enfin, malgré les gains significatifs de rendements envisagés dans ce scénario AGO, l'insuffisance de terres pour couvrir les usages régionaux s'accroît en SSA et MENA par rapport à 2003 (Figure 26, Figure 27).

Figure 26. Surfaces cultivées et EqSCL des usages d'aliments, Scénario AGO\_1 (2050)

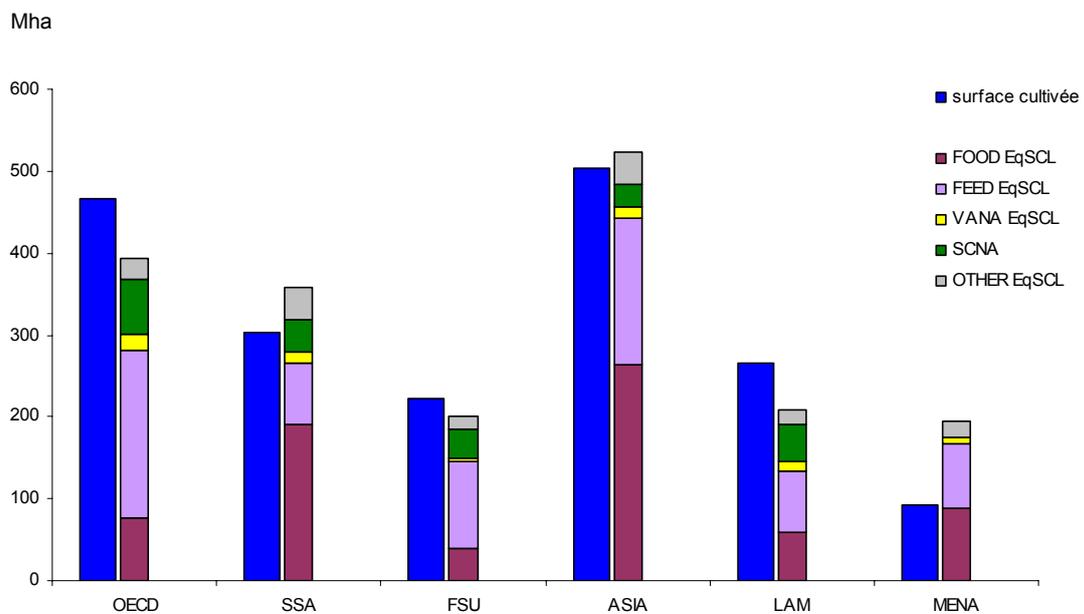
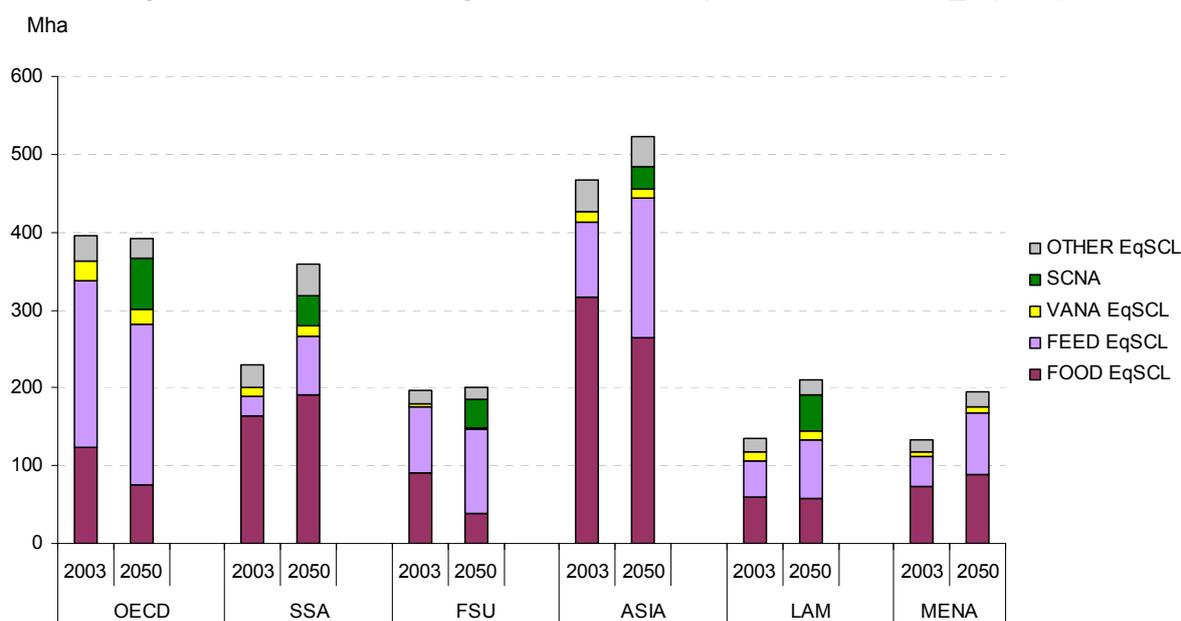


Figure 27. Evolution des usages d'aliments en EqSCL, Scénario AGO\_1 (2050)



2343. Variante 2 (AGO\_2)

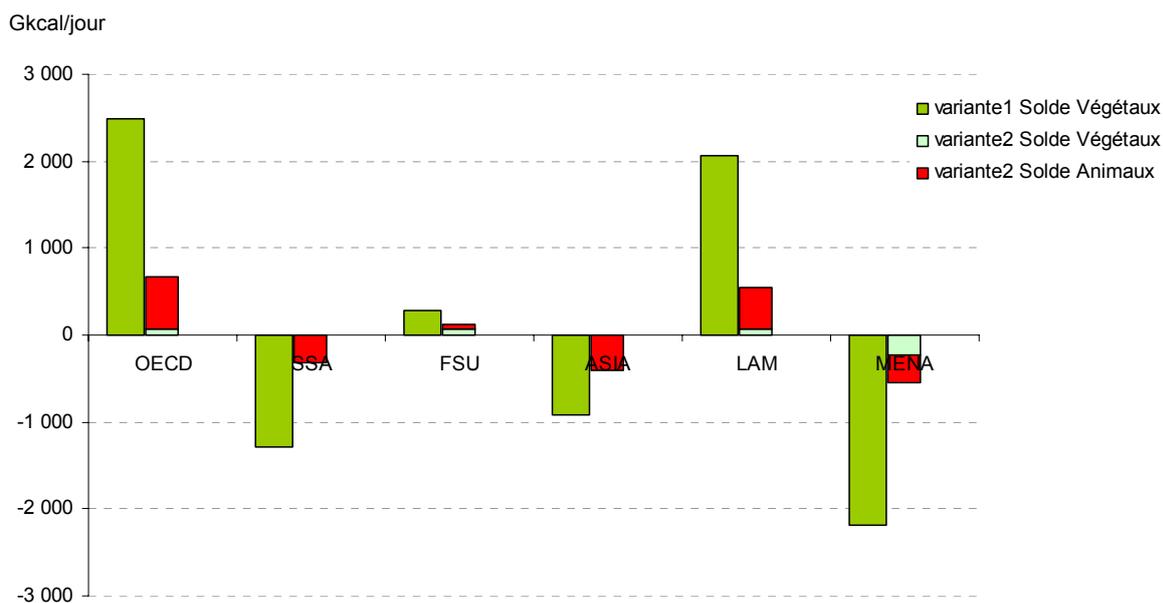
Dans cette variante de « préférence pour l'importation de calories animales » codée « AGO\_2 » (§ 2322), les régions déficitaires importent des calories végétales pour couvrir les besoins humains en calories végétales et des calories animales pour couvrir les besoins humains en calories animales. La simulation de cette variante fait apparaître un solde mondial positif en calories animale (Tableau 14).

Tableau 14. Résultats agrégés de la simulation AGO\_2

	(Gkcal / jour)	Productions	Usages	Solde Exp-Import
OECD	Végétaux	13 436	13 357	79
	Animaux	2 738	2 153	584
SSA	Végétaux	6 084	6 084	0
	Animaux	219	528	-309
FSU	Végétaux	2 398	2 319	79
	Animaux	403	363	40
ASIA	Végétaux	22 094	22 094	0
	Animaux	3 780	4 192	-412
LAM	Végétaux	7 992	7 913	79
	Animaux	1 301	835	466
MENA	Végétaux	1 985	2 223	-238
	Animaux	25	334	-309
Monde	Végétaux	53 990	53 990	0
	Animaux	8 466	8 406	60

Cette variante présente un niveau global de production végétale et d'usages très proches de la variante 1, mais elle présente des différences au plan régional, notamment pour les échanges (nets). La Figure 28 illustre comment les deux variantes parviennent à un niveau de consommations par région identique avec des échanges de nature et de volume très contrastés.

Figure 28. Solde des échanges alimentaires, Scénario AG0 (2050)



#### 2345. Brèves conclusions

Malgré des traductions, interprétations et modifications des résultats du scénario « Orchestration Globale » du MEA, nos simulations du scénario AG0 aboutissent à une production alimentaire globale relativement compatible avec les consommations prévues dans ce scénario. Ce scénario envisage un monde où les croissances de consommations et de productions se poursuivent partout dans le monde, avec l'hypothèse parallèle d'une croissance soutenue des rendements entre aujourd'hui et 2050 (Annexe 13). Ces hypothèses valent également dans les régions déficitaires nettes en 2003, ce qui conduit à une place du commerce international dans la consommation relativement stable. Le principal changement dans l'usage des sols est l'importance des SCNA, alors que les VANA poursuivent leur croissance lente. Les deux sources cumulées de productions non alimentaires représentent, en 2050, l'équivalent de 15% des surfaces cultivées dans le monde (5 % en 2003), et varient par région entre 4% (MENA) et 28% (LAM).

## 235. Simulations du scénario Agrimonde « AG1 »

### 2351. Hypothèses quantitatives

Via le module Agribiom, le GAA a été amené à traduire, expliciter et débattre les principes de son scénario AG1 (§ 2312) suivant des hypothèses quantitatives qui ont conduit à simuler les productions, usages et soldes d'échanges régionaux de biomasses alimentaires de ce scénario. L'essentielle des hypothèses adoptées pour ce scénario sont résumées dans le Tableau 15, et développées en Annexe 13 avec nos résultats de simulations suivant les deux variantes de bouclage présentées ci-après.

Tableau 15. Principales hypothèses de simulation AG1

Horizon	2050
Populations	Variante moyenne des projections nationales des Nations Unies (estimations 2007) : ~ 9 Ghab (+42% par rapport à 2003)
Rations (kcal/hab/j)	Les calories alimentaires disponibles pour l'alimentation s'élèvent à 3000 kcal/jour/hab dans chaque région (moyenne mondiale 2003), dont 2500 d'origine végétale. Répartition des calories d'autres origines : expertise GAA après analyse rétrospective.
Usages (Gkcal/j)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alimentation humaine : populations * rations</li> <li>- Alimentation animale : <ul style="list-style-type: none"> <li>Feed végétal : variable endogène (déterminée par le bouclage selon la variante utilisée)</li> <li>Feed animal : pourcentage des usages totaux de 2000</li> </ul> </li> <li>- Vana : pourcentage des usages totaux de 2000 sauf indication contraire<sup>75</sup>. [nb : moyenne mondiale 2003 = 5%] - Pertes : montant 2000 en % des usages totaux, avec borne supérieure de 4% [nb : moyenne mondiale 2003 = 4%]</li> <li>- Semences : pourcentage des usages totaux en 2000 [nb : moyenne mondiale 2003 = 3%]</li> <li>- Usages non répertoriés : valeur du «résidu» 2003 [nb : 777 Gkcal/j pour végétaux]</li> </ul>
Surfaces (ha)	Expertises GAA après analyse rétro-prospective interactive SCA : fortes augmentations (plus fortes que AGO) SCNA : même ordres de grandeur que AGO Pâtures : nettement plus élevées que AGO Forêts : du même ordre de grandeur que AGO
Rendements (kcal/ha/j)	Calories alimentaires végétales terrestres : expertises GAA après analyse rétro-prospective interactive. Croissance faible. Calories aquatiques (eaux douces, marines) : adaptation des rendements pour couvrir les niveaux d'usages régionaux
Productions animales (Gkcal/j)	Modèle choisi pour simuler les productions animales : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fonctions de production distinguant les produits de ruminants des produits de monogastriques</li> <li>- Famille MEA_6103 : fonctions régionales (régions MEA) établies à partir des données nationales 1961-2003</li> <li>- Série M080615 : fonctions linéaires réduite à deux facteurs, les concentrés d'origine terrestre (calories alimentaires végétales et animales) et les surfaces en pâture (ha), et un terme de substitution (la production de calories de ruminants dans la fonction de produits monogastriques, et vice-versa)</li> <li>- Unité du modèle : protéines en équivalent calories, la conversion des calories de protéines en calories totales étant ensuite effectuée selon les ratios régionaux 2003</li> <li>- Résolution simultanée des deux fonctions sans contrainte de rapport de production entre ruminants et monogastriques</li> </ul>
Import-Export (Gkcal/j)	Variante 1 : préférence politique des régions déficitaires pour l'autosuffisance en calories animales (importation de calories végétales seulement) Variante 2 : préférence politique des régions déficitaires pour l'autosuffisance en calories végétales ; les régions déficitaires s'approvisionnent en quantités égales dans les régions excédentaires

### 2352. Variante 1 (AG1\_1)

Dans cette variante de « préférence pour l'importation de calories végétales » codée « AG1\_1 » (§ 2321), chaque région produit la quantité de calories animales qu'elle consomme, et importe ou exporte les calories végétales excédentaires ou déficitaires pour parvenir à l'équilibre des calories animales. Afin de parvenir à un équilibre entre emplois et ressources à l'échelle mondiale, ce sont les hypothèses régionales de rendements émises par

<sup>75</sup> La quantité de VANA est supposée nulle lorsque la production régionale de calories végétales est inférieure aux besoins alimentaires humains de la région

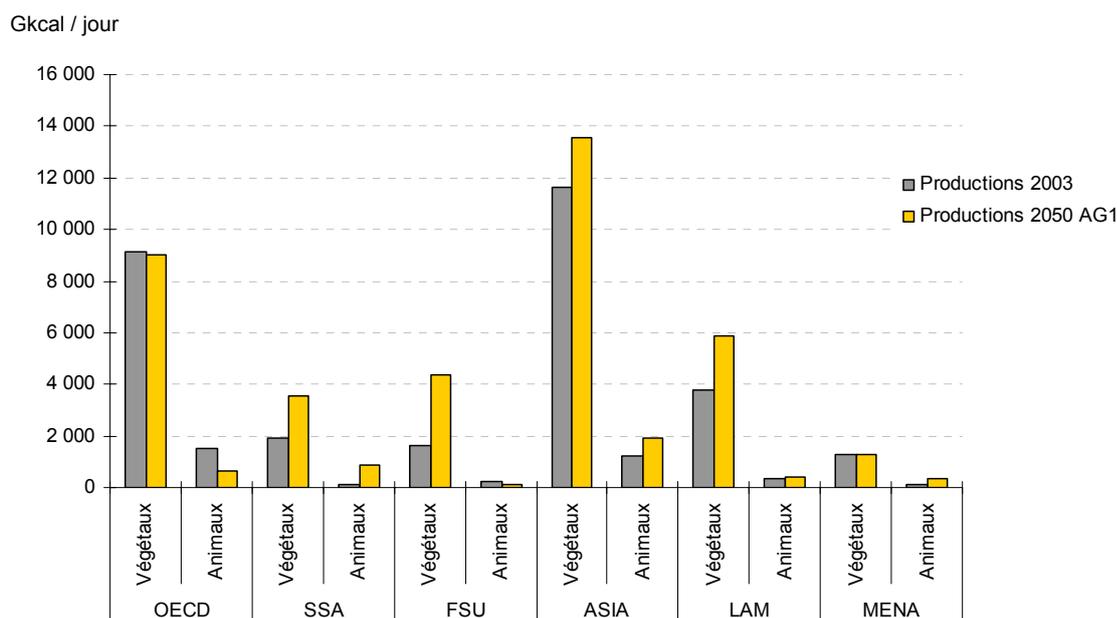
le GAA que ce dernier a décidé de réajuster, collectivement et par tâtonnement. Ainsi, au terme de la simulation, les excédents des pays excédentaires couvrent exactement les besoins des pays déficitaires (Tableau 16).

Tableau 16. Résultats agrégés de la simulation AG1\_1

	(Gkcal / jour)	Productions	Usages	Solde Exp-Import
OECD	Végétaux	9 040	4 856	4 184
	Animaux	632	632	0
SSA	Végétaux	3 525	7 515	-3 990
	Animaux	852	852	0
FSU	Végétaux	4 350	1 017	3 333
	Animaux	106	106	0
ASIA	Végétaux	13 554	16 732	-3 178
	Animaux	1 918	1 918	0
LAM	Végétaux	5 875	3 977	1 898
	Animaux	431	431	0
MENA	Végétaux	1 302	3 549	-2 247
	Animaux	335	335	0
Monde	Végétaux	37 646	37 646	0
	Animaux	4 274	4 274	0

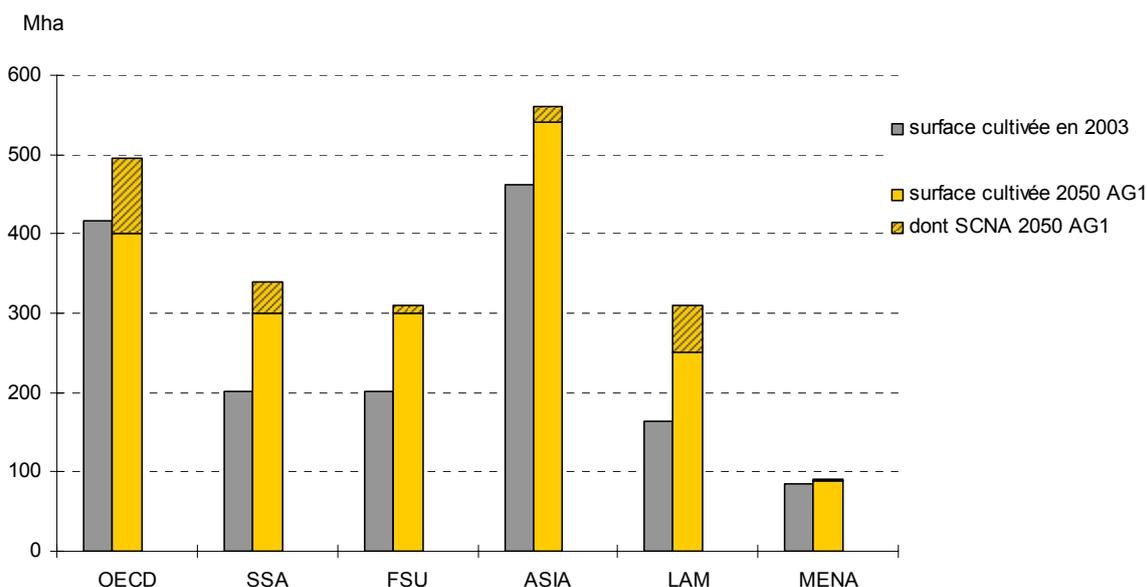
Contrairement au scénario précédent (AGO), et par rapport à la situation de référence 2003, l'accroissement de la production et des usages mondiaux de biomasses alimentaires demeure modeste : +28% pour les calories végétales et +21% pour les calories animales à l'échelle mondiale, la Figure 29 ventilant ces données par région MEA.

Figure 29. Evolution des productions alimentaires, Scénario AG1 (2003 & 2050)



Dans ce scénario, les surfaces cultivées alimentaires augmentent nettement dans toutes les régions sauf MENA, les rendements alimentaires restant proches de ceux de 2003 en raison du changement profond de technologie envisagé dans ce scénario (intensification écologique). Ces augmentations de surfaces sont accentuées par les SCNA qui peuvent être importantes dans certaines régions (Figure 30), comme dans le scénario AGO.

Figure 30. Evolutions des surfaces cultivées, Scénario AG1 (2003 & 2050)



La différence entre les terres théoriquement nécessaires pour satisfaire les besoins d'une région par sa propre production et la surface effectivement cultivée dans le scénario s'est accrue en SSA, MENA et en Asie. Le déficit en terres cultivées dans ces régions s'est donc accru par rapport à la situation de 2003. (Figure 31, Figure 32)

Figure 31. Surfaces cultivées et EqSCL des usages d'aliments, Scénario AG1\_1 (2050)

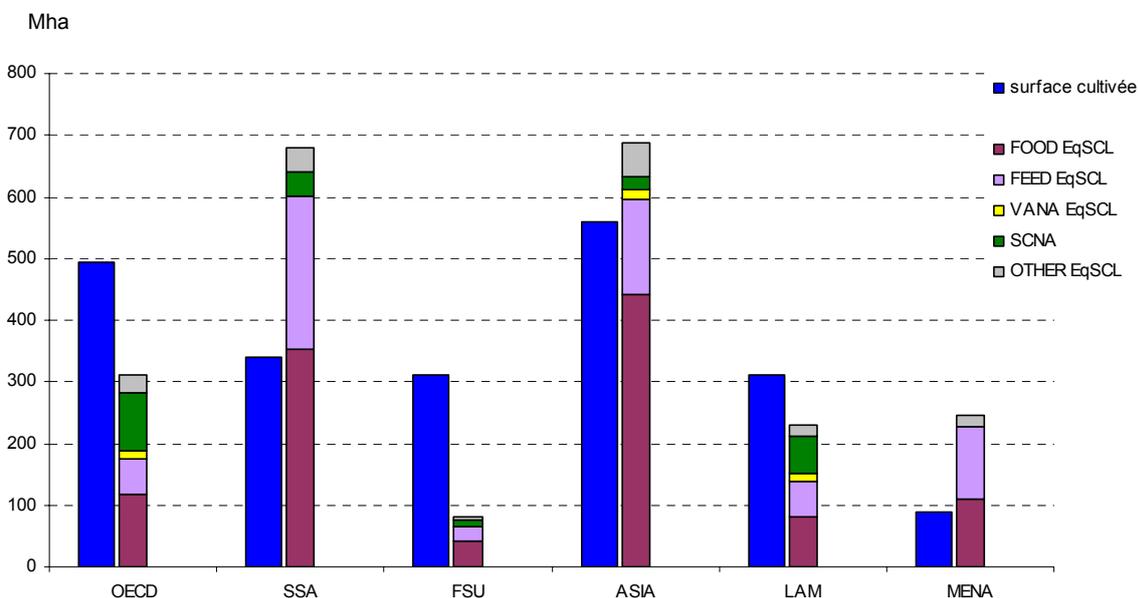
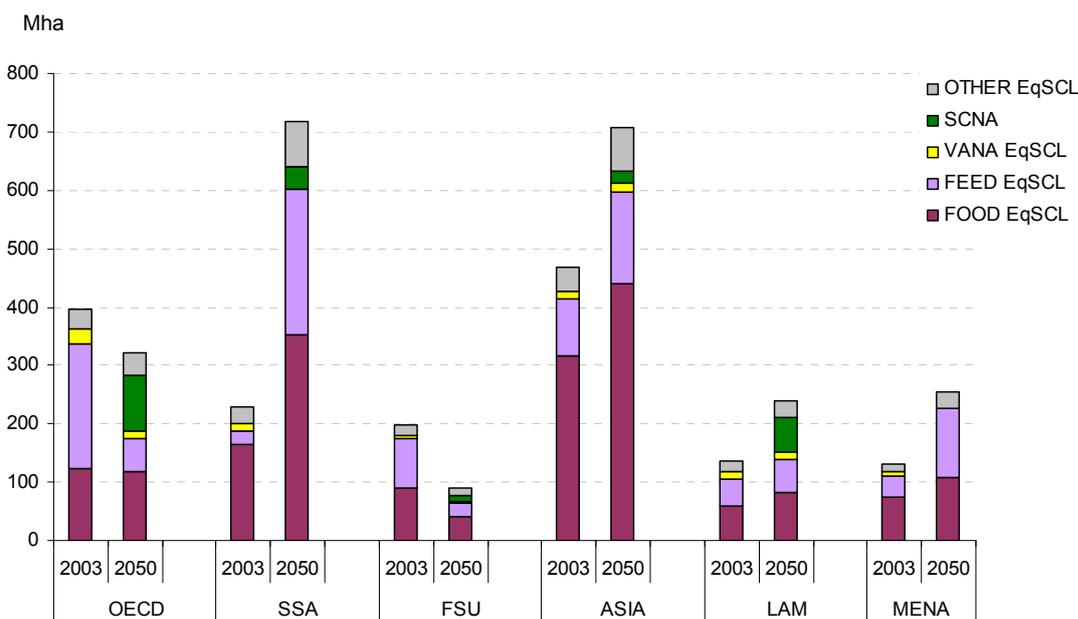


Figure 32. Evolution des usages d'aliments en EqSCL, Scénario AG1\_1 (2003 & 2050)



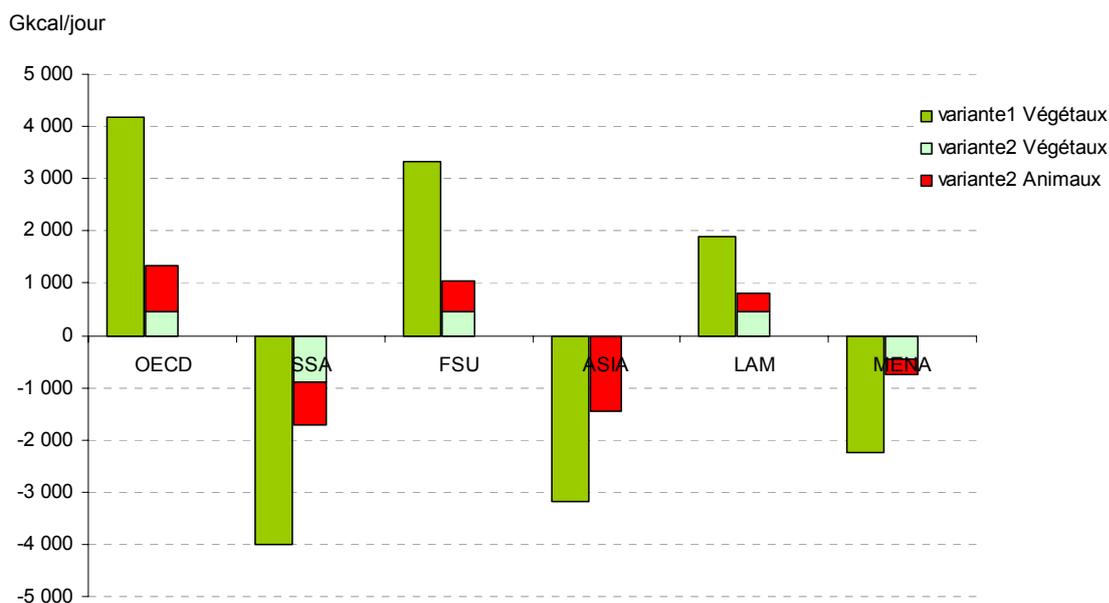
2353. Variante 2 (AG1\_2)

Les conclusions de la deuxième variante de simulation demeurent assez proches de celles de la première. Toutefois, il apparaît ici clairement que, toute chose égale par ailleurs, cette variante est plus coûteuse en ressources puisque le solde global obtenu avec les mêmes hypothèses quantitatives que la variante 1 est négatif (Tableau 17). Dans la variante 2, l'Afrique sub-saharienne et l'Afrique du Nord et Moyen Orient importent pratiquement toute leur production animale, alors que ces régions la produisent localement dans la variante 1 : lorsque la production animale augmente, l'efficacité de la conversion des protéines végétales en protéines animales diminue, comme nous l'avons observé sur le passé (Figure 8) et reproduit dans les fonctions de productions animales. Sous ces conditions, pour un niveau de consommation donné, il est donc plus économe de produire un peu de produits animaux dans les régions importatrices que pas du tout, quitte à importer l'aliment du bétail (Figure 33).

Tableau 17. Résultats agrégés de la simulation AG1\_2

	(Gkcal / jour)	Productions	Usages	Solde Exp-Import
OECD	Végétaux	9 040	8 590	450
	Animaux	1 525	632	893
SSA	Végétaux	3 525	4 426	-901
	Animaux	22	851	-829
FSU	Végétaux	4 350	3 900	450
	Animaux	689	105	584
ASIA	Végétaux	13 554	13 554	0
	Animaux	481	1 918	-1 437
LAM	Végétaux	5 875	5 425	450
	Animaux	777	431	346
MENA	Végétaux	1 302	1 752	-450
	Animaux	24	335	-311
Monde	Végétaux	37 646	37 647	0
	Animaux	3 519	4 273	-754

Figure 33. Solde des échanges alimentaires, Scénario AG1 (2050)



#### 2354. Brèves conclusions

Les simulations AG1 illustrent un scénario d'hypothèses de ressources et d'hypothèses d'usages de biomasses alimentaires compatibles entre elles, et pourtant très différentes du scénario AGO. La variante 2 des simulations AG1 permet de voir que même si l'Afrique subsaharienne et l'Afrique du Nord et le Moyen Orient n'allouent aucune calorie végétale aux animaux (hormis le fourrage), les autres utilisations de calories végétales dépassent leurs productions. Par ailleurs, dans les deux variantes du scénario, ces deux régions et l'Asie ont un déficit net en calories nettement plus élevé en 2050 qu'en 2003. Les productions non-alimentaires (dont bioénergies) occupent dans ce scénario une place assez proche de celle occupée dans le scénario AGO, avec néanmoins une surface SCNA en OCDE et LAM sensiblement plus importante dans le scénario AG1 (Figure 35).

#### 236. Conclusion des simulations

La mise en rapport des deux scénarios illustre deux modes d'évolution très contrastés de l'agriculture et de l'alimentation, mais où les ressources et les emplois envisagés sont compatibles entre eux dans chacune de ces évolutions.

Le scénario Agrimonde AGO est un scénario d'accroissement important de la production alimentaire (+84% de calories végétales et +137% de calories animales par rapport à 2003). Fondé sur un accroissement notable des rendements y compris dans les régions de production déjà intensive, il apporte un niveau de disponibilité moyenne supérieur ou égal à celui du scénario AG1 dans chaque région, sauf en Afrique subsaharienne.

Le scénario Agrimonde AG1 est par contre un scénario d'accroissement modéré de la production alimentaire (+28% de calories végétales et +20% de calories animales par rapport à 2003) alors que les populations 2050 dans chaque région demeurent identiques aux hypothèses du scénario AGO (+42% globalement par rapport à 2003). Malgré cela, la disponibilité alimentaire moyenne s'accroît en Asie et en Afrique subsaharienne (régions où

elle est aujourd'hui inférieure à 3000 kcal/jour/personne). Ce scénario repose sur des révolutions profondes tant au plan de la production (intensification écologique moins gourmande en eau et énergies fossiles, notamment) que de la consommation alimentaire (plafonnement des disponibilités à 3000 kcal/jour, avec une part de calories animales inférieure à 500), toutes deux étant estimées beaucoup plus durables par le GAA que dans le scénario AGO.

Figure 34. Productions alimentaires, Scénarios AGO\_1 et AG1\_1 (2050)

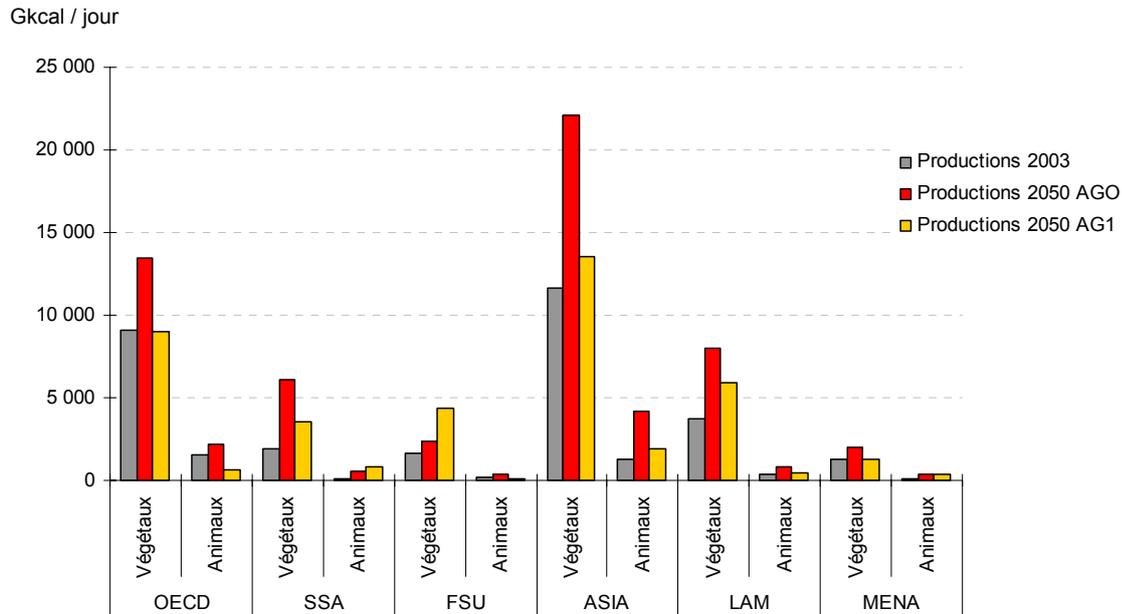


Figure 35. Surfaces cultivées, Scenarios AGO et AG1 (2050)

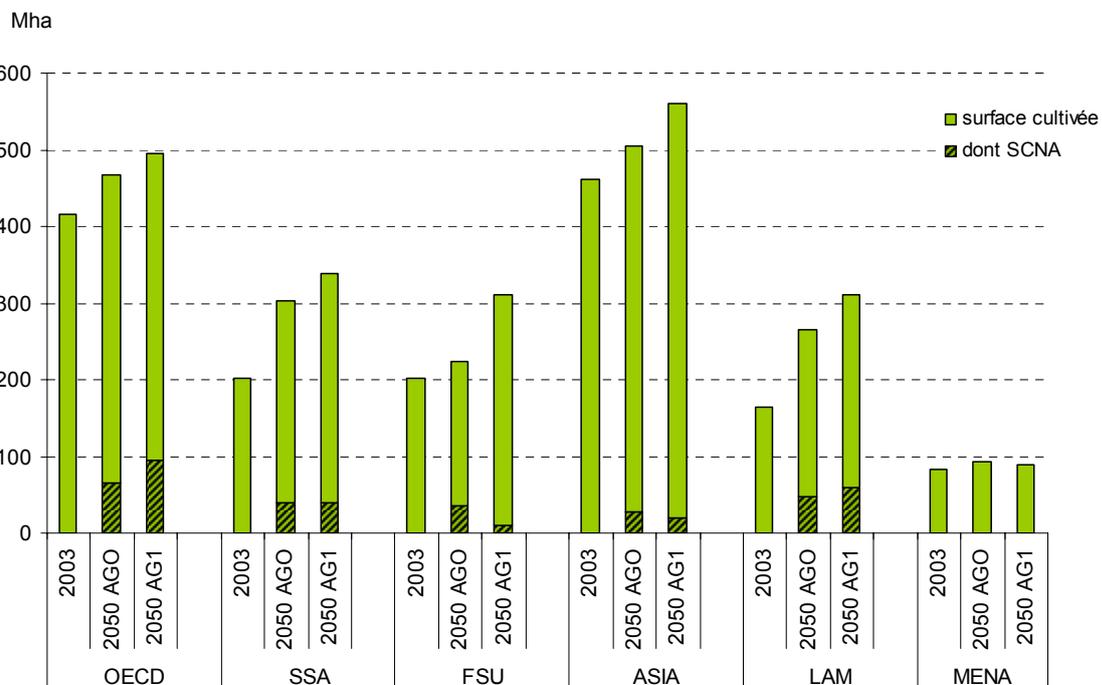
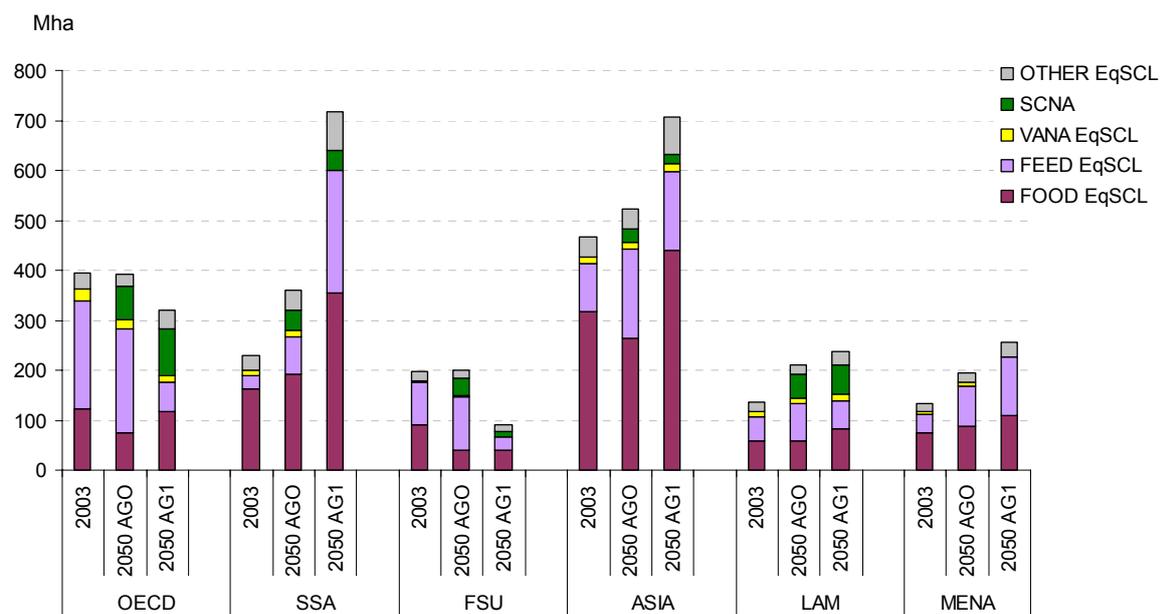


Figure 36. Usages d'aliments en EqSCL, Scénarios AGO\_1 et AG1\_1 (2050)



### **3. Modélisation hybride de l'équilibre partiel des terres disponibles**

La démarche de prospective quantitative mobilisée dans le volet précédent possède deux avantages principaux : d'une part elle constitue un outil efficace de mise en commun et de discussion des vues d'expert sur les dynamiques agricoles sur le long terme, d'autre part le cadre quantitatif comptable sur lequel elle s'appuie assure un premier niveau de cohérence physique indispensable aux scénarios de long terme – le tout formant un style d'approche entre prospective discursive et modélisation que l'on peut rapprocher des nombreux exercices similaires effectués par le Conseil Mondial de l'Energie, des « Horizons Energétiques Mondiaux » (Frisch *et al.*, 1989) à aujourd'hui.

Cependant, l'examen des problèmes posés par un développement important des agrocarburants soulève des questions qu'il est difficile d'appréhender et de résoudre sans aller plus loin dans la modélisation des interactions entre croissance économique, évolution du système énergétique et dynamique d'usage des sols. Le cahier des charges d'un outil permettant de répondre à ce besoin peut être énoncé simplement en trois points :

- articuler les contraintes techniques sur le développement des agrocarburants et sur l'ensemble du système énergétique avec les signaux prix et les dynamiques macroéconomiques ;
- représenter la compétition sur l'usage des sols et les flexibilités qui permettent de gérer cette compétition (de la déforestation à l'intensification des productions agricoles) ;
- ménager la possibilité d'un couplage avec les modèles de cycle du carbone et du climat pour d'une part mesurer l'impact climatique des changements d'usage des sols et, d'autre part, intégrer la rétroaction du climat sur la productivité et les possibilités de gestion de l'espace.

La satisfaction de ces objectifs permettra en quelque sorte de faire une synthèse des analyses explicitées dans les deux premières parties de ce rapport, avec l'ambition d'un outil intégrateur, focalisé sur l'étude des effets systémiques, avec un souci principal de triple cohérence physique, technique et économique.

Pour répondre à ce cahier des charges, nous avons commencé l'élaboration d'un module d'usage des sols, conçu pour être intégré dans l'architecture globale de modélisation hybride Imaclim-R. Ce troisième volet s'attache à présenter la première maquette du module prénommé Nexus-LandUse (ou Nexus-LU) et les premiers tests effectués de manière autonome, c'est-à-dire avant intégration dans l'architecture globale. La première partie détaille le principe de fonctionnement du module, en effectuant un bref détour théorique sur les mécanismes de formation d'un prix de la terre. La seconde partie détaille le contenu et les équations du modèle. La troisième partie présente une analyse des premiers résultats. Enfin la conclusion permettra d'entrevoir les étapes ultérieures de développement du modèle.

## **31. Principes généraux du Nexus-LandUse**

### *311. Un modèle mondial d'allocation des sols*

Le modèle Nexus-LU est un modèle mondial d'allocation des sols selon les grandes catégories d'usages : élevage extensif, culture pour l'élevage intensif, cultures pour l'alimentation humaine et autres produits non énergétiques (fibres, coton, etc.), cultures énergétiques de première et seconde génération et exploitation forestière, compte tenu par ailleurs des zones naturelles protégées, zones urbanisées et zones non exploitables (déserts, montagnes, etc.).

Le principe directeur du modèle est un équilibre partiel offre-demande des surfaces disponibles. La demande de terres découle de besoins amont de calories alimentaires, de produits végétaux (bois, coton, fibres), d'agrocultures et éventuellement de séquestration du carbone, mais plusieurs arbitrages intermédiaires peuvent faire varier significativement la demande de terres pour des besoins amont donnés, en particulier l'intensification des cultures végétales et le passage d'un élevage extensif à un élevage intensif. L'offre de terres dépend plus directement de la valeur de la terre, dont la croissance augmente la rentabilité potentielle des terres non exploitées (forêts, friches ou zones à faible rendement), tout en étant contrainte par des dynamiques externes au modèle : changement climatique, désertification, étalement urbain.

Le prix des biens agricoles est une sortie du modèle et correspond au coût unitaire de production sur la terre la moins productive. Cette composante découle par conséquent de coefficients techniques, tels que les consommations intermédiaires énergétiques. La résolution de l'équilibre se fait quant à elle sur la « valeur de la terre », qui s'interprète comme un indicateur de rareté de celle-ci. Quelque soit le prix, on suppose que la demande alimentaire y est totalement inélastique afin de satisfaire systématiquement cette dernière. Dans le prototype actuel du modèle, on suppose également que cette demande n'est fonction que du PIB et de la population.

Le principe de modélisation retenu consiste classiquement à allouer à chaque terre l'usage des sols pour lequel la production est la plus rentable. Dans le Nexus, une culture sur l'une des parcelles, regroupées dans notre modèle en classes de terres, est considérée comme rentable si elle répond à une demande, et s'il n'existe pas une autre utilisation des sols pour laquelle le coût de production unitaire<sup>76</sup> sur la parcelle concernée est plus faible.

Chacune des classes de terres se caractérise par le rendement maximal qu'elle peut atteindre. Les coûts de production unitaires sont par conséquent différents sur chacune de ces classes et pour chacun des usages, ce qui permet de guider les arbitrages pour obtenir une répartition des usages des sols. Les prix de marché pour chacune de ces classes sont à distinguer de la « valeur de la terre » définie ci-dessus. En effet, pour une valeur de la terre donnée, les prix sur le marché foncier varient en fonction du niveau de productivité de la terre.

---

<sup>76</sup> Le coût de production unitaire rapporte ici le total des coûts de production par hectare au rendement exprimé en calories par hectare.

### *312. Le mécanisme théorique de formation du prix de la terre*

Le prix de la terre constitue la variable clé de notre modèle. C'est pourquoi nous détaillons dans cette section le mécanisme théorique de formation de ce prix, à partir de la demande en biens agricoles et forestiers.

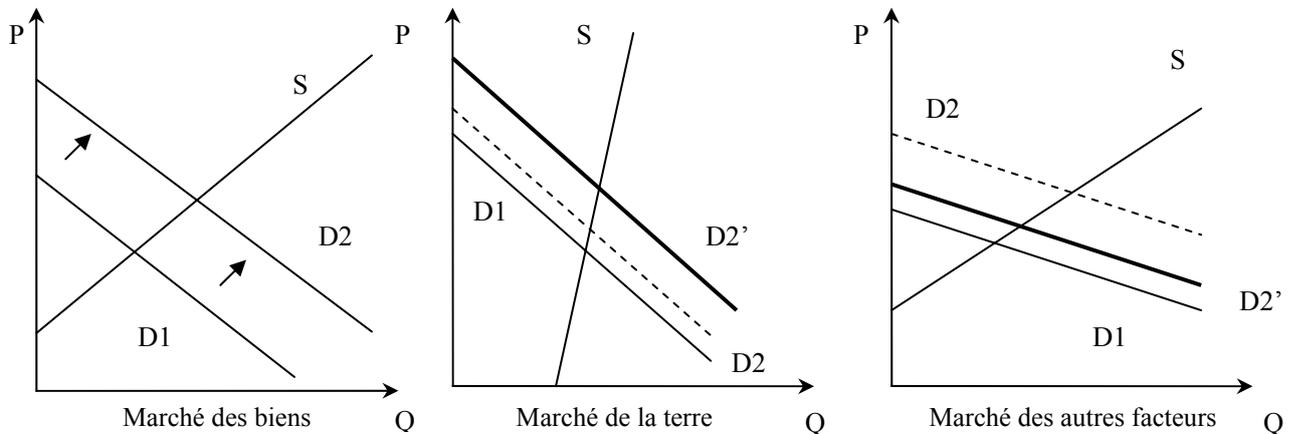
Le développement des biocarburants, dans un contexte de tensions sur les marchés alimentaires, constitue un accroissement de la demande en biens agricoles. Sur le marché des facteurs de production agricole, que sont notamment le travail, les engrais et la terre, cet accroissement induit une augmentation de la demande. La variation de la demande adressée à chacun des facteurs de production dépend alors de l'élasticité-prix et des possibilités de substitution en facteurs.

Dans le cas où l'élasticité-prix de l'offre de terre est faible par rapport aux autres facteurs, les exploitants agricoles chercheront – en vue de minimiser leur coût de production – à satisfaire l'accroissement de la demande en ayant recours en priorité au travail et aux engrais, dont les prix réagissent moins vite à une augmentation de la demande. Cependant, cela n'est possible que si les facteurs de production sont fortement substituables. Dans le cas d'une faible substituabilité des facteurs, leur part respective dans le processus de production est relativement stable, et les exploitants ne disposent que d'une faible marge de manœuvre pour accroître la production sans accroître leur consommation de terres. La variation de la demande de terres est par conséquent d'autant plus forte que les élasticités de substitution entre facteurs sont faibles. Inversement, dans le cas où l'élasticité-prix de l'offre de terre est forte par rapport aux autres facteurs, la demande de terres sera d'autant plus forte que l'élasticité de substitution avec les autres facteurs sera élevée.

Sur la Figure 37, l'augmentation de la demande en biens agricoles, illustrée par le déplacement de la droite de D1 en D2 sur le marché des biens, se reporte principalement sur les facteurs de production ayant la plus forte élasticité-prix dès lors que les élasticités de substitution sont suffisamment élevées. La demande de travail et d'engrais varie donc fortement (de D1 en D2) dans le cas d'une forte élasticité de substitution, tandis que la demande de terres n'augmente que légèrement (de D1 en D2). Dans le cas d'une faible élasticité de substitution, l'accroissement de demande de biens n'a d'autres possibilités que de se reporter principalement sur le marché de la terre. La demande de terres augmente ainsi fortement (de D1 en D2'), tandis que la demande adressée aux autres facteurs ne varient que modérément (de D1 en D2'). La Figure 38 détaille cette même logique lorsque l'élasticité du prix de la terre à une variation de sa demande est forte.

Figure 37. Elasticité-prix de la terre et marchés des facteurs de production (cas 1)

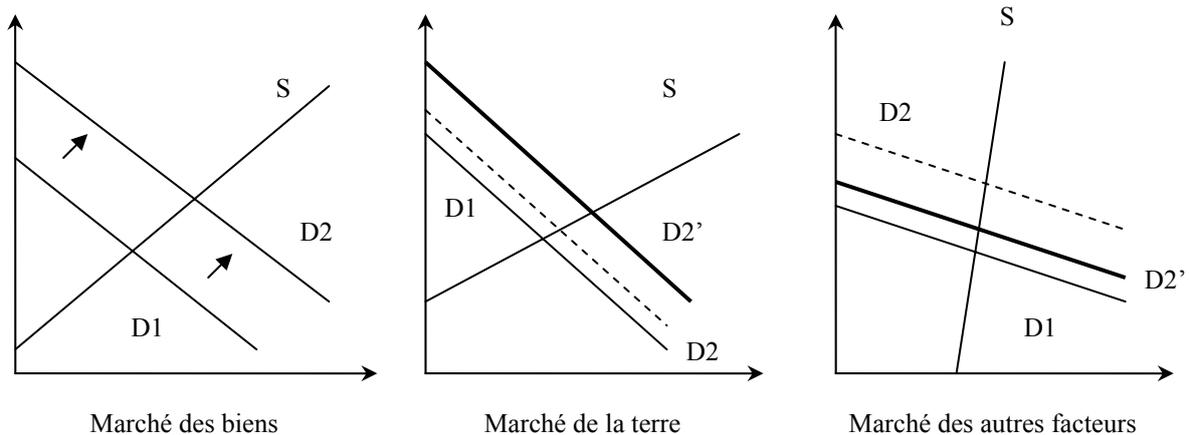
Effets sur les marchés des facteurs de production d'une augmentation de la demande sur le marché des biens dans le cas d'une faible élasticité-prix de l'offre de terre



Lecture : sur le marché de la terre et des autres facteurs, les droites D2 correspondent à la variation de la demande avec forte élasticité de substitution, et D2' avec faible élasticité de substitution.

Figure 38. Elasticité-prix de la terre et marchés des facteurs de production (cas 2)

Effets sur les marchés des facteurs de production d'une augmentation de la demande sur le marché des biens dans le cas d'une forte élasticité-prix de l'offre de terre



Lecture : sur le marché de la terre et des autres facteurs, les droites D2 correspondent à la variation de la demande avec faible élasticité de substitution, et D2' avec forte élasticité de substitution.

Maintenant que nous avons vu comment réagit la demande de terres aux évolutions du marché des biens agricoles et forestiers, analysons la façon dont se fixe le prix de la terre. Dans la théorie Ricardienne, le prix de la terre correspond à la rente, qui est définie comme « la portion du produit de la terre qui est payée au propriétaire pour l'utilisation des qualités originales et indestructibles du sol ». Selon Ricardo, cette rente se compose de deux éléments :

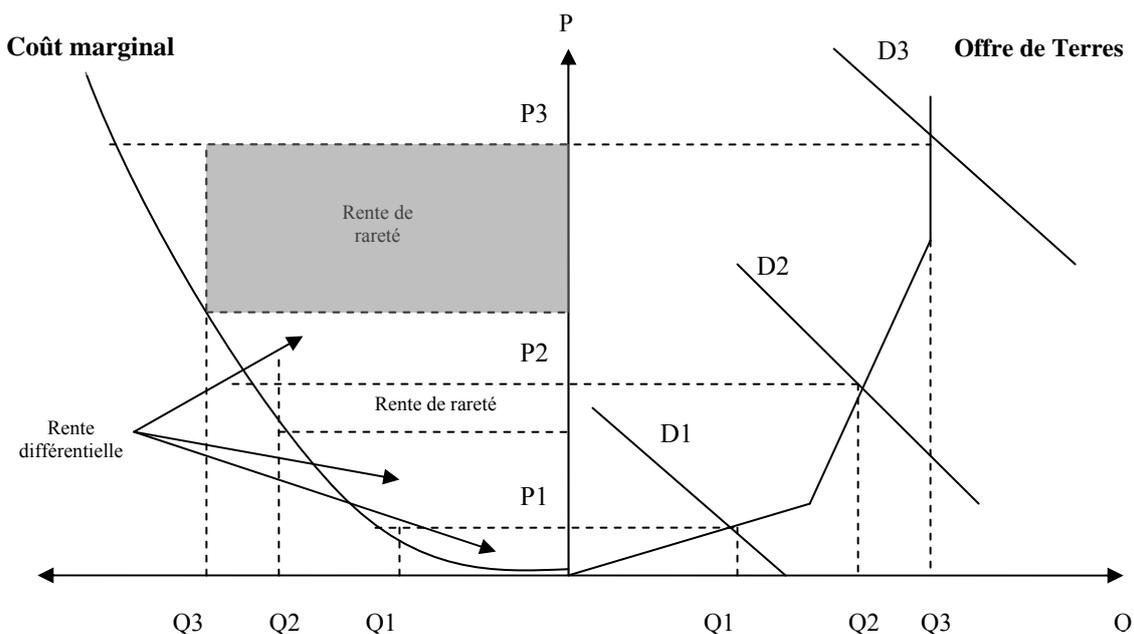
- Une rente dite « différentielle » qui est telle que le profit sur la dernière terre mise en culture (supposée être moins fertile que les précédentes) est positif. Elle résulte de la non-homogénéité du bien de production. La rente différentielle est égale à la différence entre la valeur de la production et son coût sur la terre marginale. Ainsi, elle est nulle sur cette terre, et est d'autant plus importante sur une terre donnée que son coût de production est faible par rapport à celui de la terre marginale.

- Une rente de rareté, qui apparaît dès lors qu'il existe des tensions sur le marché de la terre. Elle résulte alors de la loi de l'offre et de la demande de terres.

La Figure 39 illustre le mécanisme de formation des prix dans l'analyse Ricardienne. Trois cas sont envisagés dans lesquels la courbe de demande est respectivement au niveau D1, D2 et D3. La courbe d'offre se décompose quant à elle en trois parties caractérisées par une pente de plus en plus forte. Autrement dit, chaque partie correspond à un certain degré de rareté de la terre : au point d'intersection de la courbe d'offre et de la droite D1, la terre est facilement accessible, et le prix de la terre est essentiellement constitué de la rente différentielle (voir cadran de gauche) ; au second point d'intersection, la terre se raréfie, et la proportion de la rente de rareté dans le prix de la terre s'accroît ; au dernier niveau, une fois que plus aucune terre n'est disponible, toute augmentation de la demande se répercute intégralement dans la rente de rareté de la terre.

Le Nexus-LandUse repose sur ces fondements théoriques : le prix de la terre est déterminé par la loi de l'offre et la demande ; la demande de terres résulte de la demande en biens agricoles et forestiers et d'arbitrages entre facteurs de production<sup>77</sup> ; enfin, la fonction d'offre de terres reflète une raréfaction progressive de ce facteur.

Figure 39. Le mécanisme de formation du prix de la terre dans la théorie Ricardienne



### 313. L'intégration du Nexus-LandUse dans Imaclim-R

Le modèle Nexus-LU est destiné à être intégré dans l'architecture globale Imaclim-R, qui représente l'évolution annuelle du système énergétique au sein de l'économie toute entière, sur une base de désagrégation du monde en 12 régions et 12 secteurs. L'intégration de Nexus-LU sera facilitée par la conception modulaire d'Imaclim-R, explicitement orientée vers l'intégration de modules multiples comme le Nexus-LU. Lors de cette intégration, les

<sup>77</sup> A ce stade, seuls les arbitrages entre le facteur terres et les intrants énergétiques sont modélisés. Le facteur travail, pour l'instant agrégé aux coûts fixes, sera détaillé dans une version ultérieure du modèle.

indicateurs d'activité qui conditionnent les demandes amont et les contraintes sur l'offre dans Nexus-LU seront directement extraits d'Imaclim-R.

*3131. Le modèle Imaclim-R*

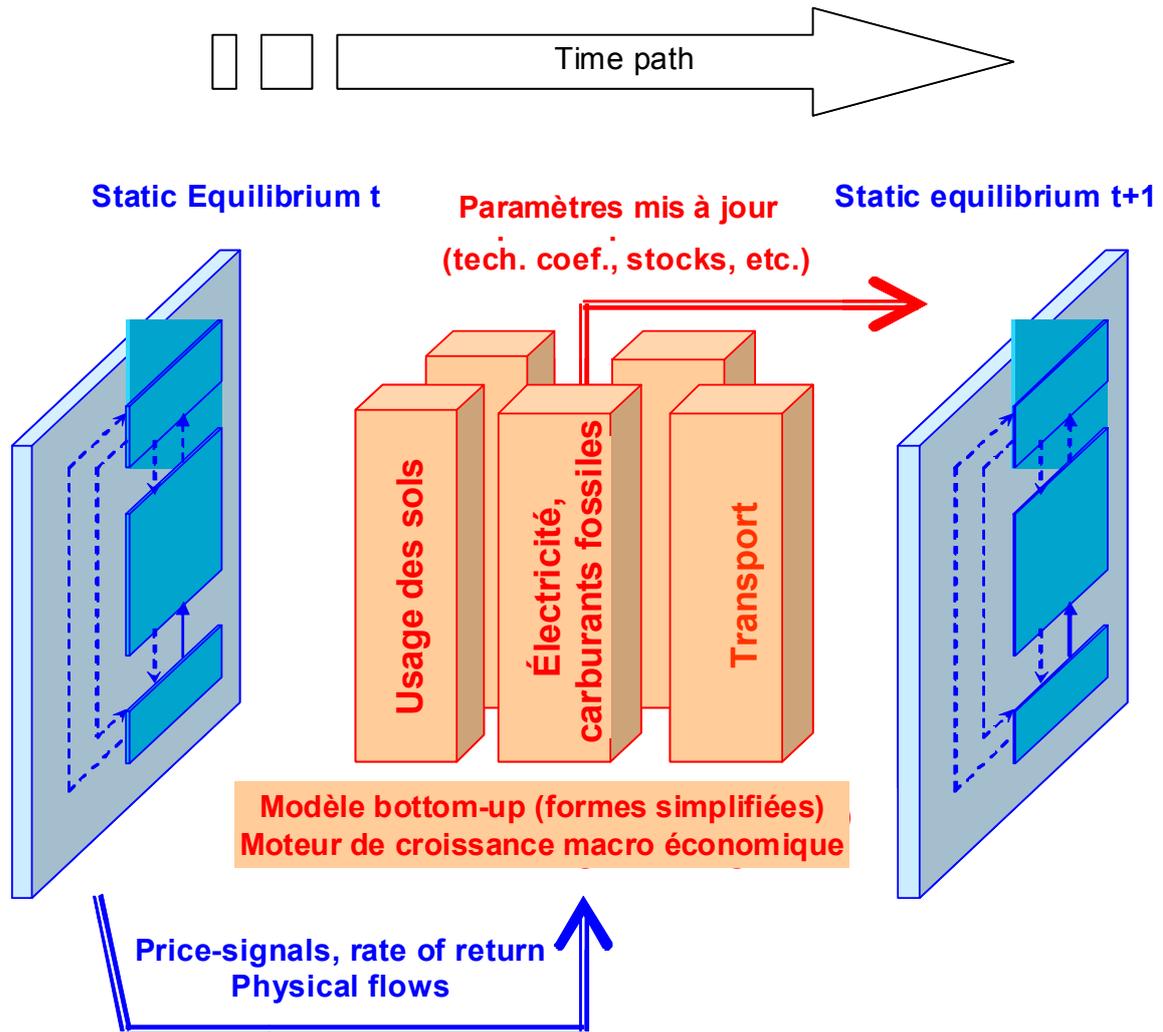
Imaclim-R repose sur une description explicite de l'économie à la fois en valeurs monétaires et en quantités physiques, les deux étant liées par le jeu des prix relatifs. Grâce à cette représentation de variables physiques explicites (et pas « subrogées » comme dans les modèles macro-économiques compacts), le modèle fournit une vision duale de l'économie permettant de vérifier si l'économie projetée repose sur une réalité technique plausible et, à l'inverse, si le système technique projeté s'insère dans un contexte économique cohérent, notamment avec le système des prix relatifs interdépendants.

Imaclim-R se fonde sur une structure récursive où l'évolution des structures de coûts de production pour chaque secteur dépend de modules technologiques sectoriels, intercalés entre les équilibres statiques successifs :

(a) Au sein d'un équilibre statique annuel, les technologies sont supposées fixes et la flexibilité technique est réduite au minimum ; les leviers d'adaptation des producteurs résident dans leur taux d'utilisation des équipements et capacités installés. La résolution de chaque équilibre statique fournit un « cliché » de la structure de l'économie à la date considérée : un ensemble de prix relatifs, de niveaux de production, de flux physiques, les taux de profit pour chaque secteur et l'allocation des investissements entre les secteurs ;

(b) Entre chaque équilibre statique, des modules dynamiques représentent les évolutions démographiques, l'accumulation du capital, et les choix technologiques des différents agents de l'économie, à travers des formes réduites de modèles sectoriels détaillés. Ces formes réduites calculent la réaction des systèmes techniques, en fonction des paramètres économiques obtenus dans les équilibres statiques précédents et des anticipations qu'ils permettent de formuler. Ils renvoient ensuite ces informations au module statique sous la forme de nouveaux coefficients techniques pour calculer l'équilibre suivant. A chaque date, les agents peuvent choisir de nouveaux équipements de façon flexible parmi un portefeuille de technologies disponibles ; ces choix induisent une modification à la marge des coefficients input-output et de la productivité globale, en tenant compte des technologies déjà incorporées dans les équipements existants, qui résultent des choix techniques passés. Ceci revient à une fonction de production « putty-clay », qui permet de représenter l'inertie des systèmes techniques. De plus, le caractère récursif du modèle et le choix d'une résolution année par année permet de tenir compte du fait que les économies ne réagissent pas seulement aux tendances moyennes des signaux économiques mais aussi à leur volatilité.

Figure 40. L'architecture réursive d' IMACLIM-R

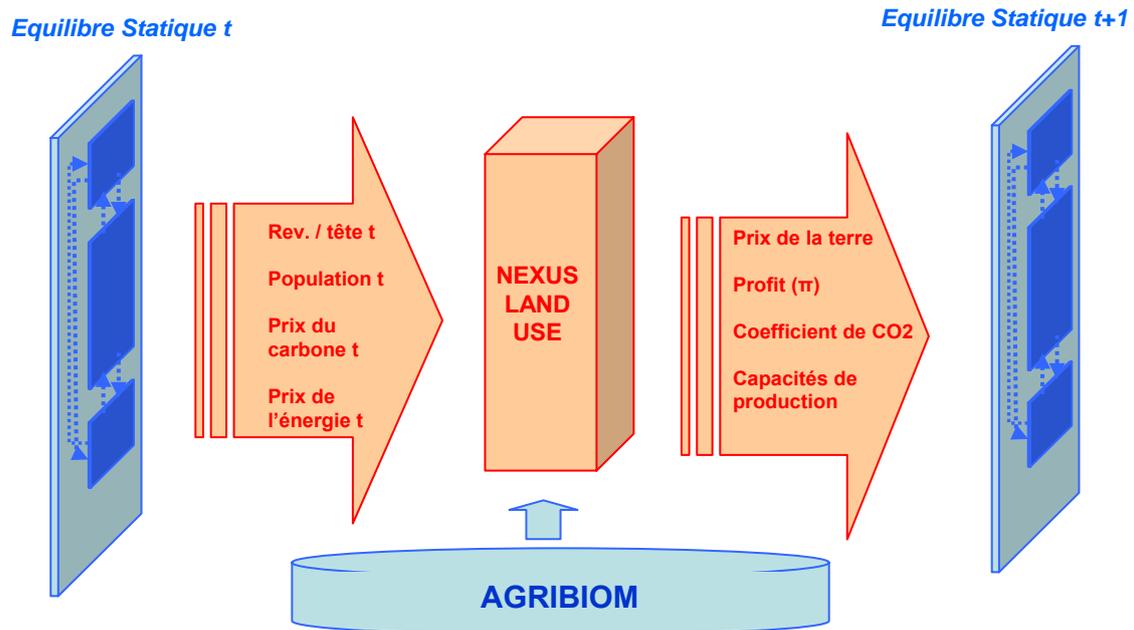


3132. Fonctionnement du Nexus-LU au sein d'Imaclim-R

Le Nexus-LandUse a vocation à s'intégrer dans l'architecture décrite ci-dessus, en complétant l'ensemble des modules sectoriels existants. Afin de s'assurer du bon fonctionnement du modèle, c'est une première version, indépendante d'Imaclim-R, qui est en cours de développement et présentée ici.

A partir des indicateurs économiques renvoyés par l'équilibre statique (indicateurs d'activités et signaux prix) sera déduite une demande de biens agricoles et forestiers. Nexus-LU déterminera alors la réaction des systèmes agricoles à la demande qui lui est adressée : choix techniques en matière d'intensification de la production, répartition des usages des sols entre productions alimentaires et non alimentaires, etc. Compte tenu de ces arbitrages, le prix de la terre d'équilibre reflètera la raréfaction relative du facteur terre, ainsi que l'évolution du profit du secteur agricole, et les capacités de production. Une estimation des émissions multigaz de GES (en équivalent CO<sub>2</sub>) sera également développée.

Figure 41. Le fonctionnement intégré du Nexus-LandUse



Du point de vue des données, Nexus-LU est alimenté en données par Agribiom, ainsi que par les sorties du modèle Orchidée développé par le LSCE (CEA).

Grâce à ce fonctionnement intégré à la structure globale de l'économie, Nexus LU permettra de décrire les interactions existantes entre les usages des sols et certains paramètres économiques, politiques ou techniques comme le prix de l'énergie, la croissance économique et démographique, le progrès technique ou encore le contexte institutionnel.

### 3133. Niveau d'agrégation

Dans un premier temps, le Nexus est construit pour un seul pays. Dans l'exercice de projection que nous présentons ci-après, le modèle est calé sur les données du Brésil pour l'année 2001. A terme, le Nexus devra reprendre les 12 régions du modèle Imaclim R.

Deux grands types de productions sont retenus dans le modèle : végétale et animale. Cette dernière peut être produite soit en extensif – sur des pâtures –, soit en intensif. Dans ce dernier cas, la production se fait à partir d'aliments issus de la culture végétale. A terme, une des pistes de développement pourra être d'augmenter le nombre de types de productions végétales et animales<sup>78</sup>.

<sup>78</sup> A cet égard, une distinction comme dans Agribiom entre monogastriques et ruminants s'avérera particulièrement pertinente dans la perspective d'estimer les émissions de GES issues du land use.

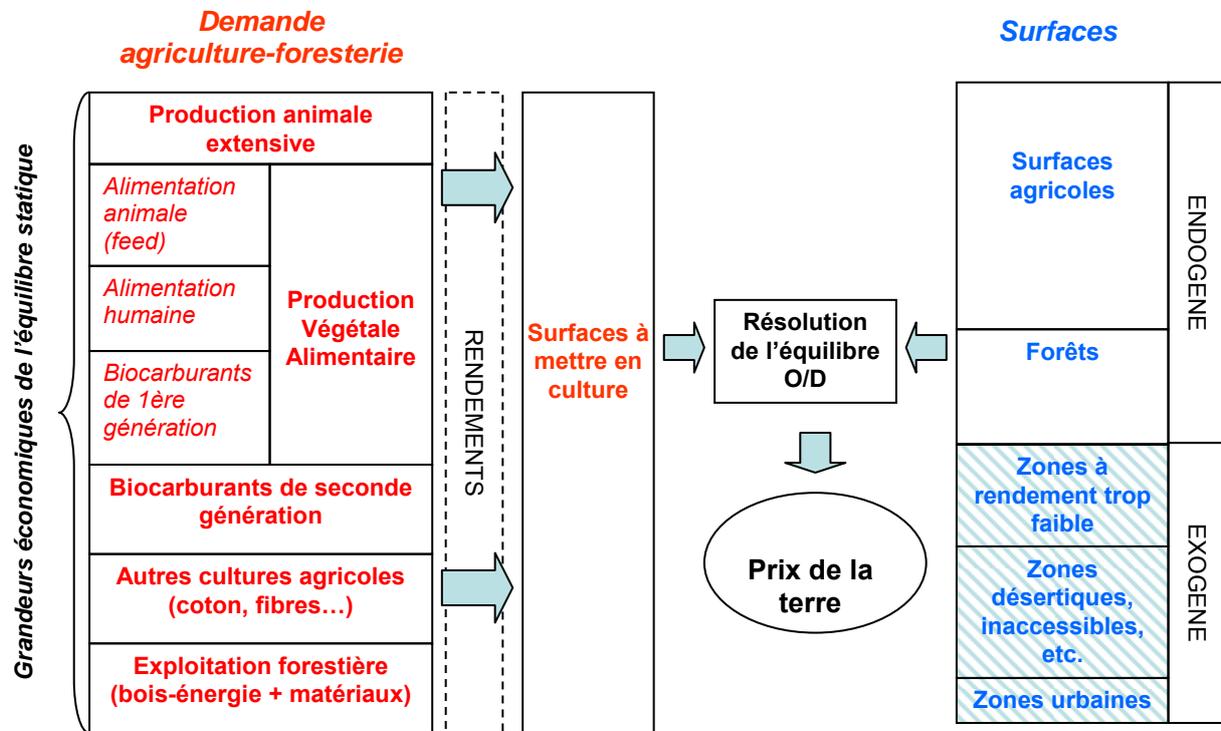
## 32. Descriptif complet du prototype

### 321. Architecture du modèle

Le modèle est composé de deux blocs principaux (Figure 42). A partir des demandes en produits agricoles et forestiers<sup>79</sup>, et compte tenu des rendements, le premier bloc permet d'obtenir le volume total de surfaces à mettre en culture pour répondre à la demande. Le second bloc correspond au total des surfaces disponibles, duquel on retranche les zones à rendement trop faible, les zones désertiques et les zones urbaines. Ces dernières seront supposées croître à un rythme constant au cours du temps.

La comparaison des surfaces à mettre en culture et des surfaces disponibles permet d'obtenir un équilibre Offre / Demande, duquel est dérivé un prix de la terre.

Figure 42. Architecture du modèle Nexus-LU



<sup>79</sup> Les demandes en biens agricoles et forestiers sont exprimées en calories sauf pour les trois dernières catégories (biocarburants de seconde génération, autres cultures agricoles et exploitation forestière), pour lesquelles les demandes sont exprimées en hectare.

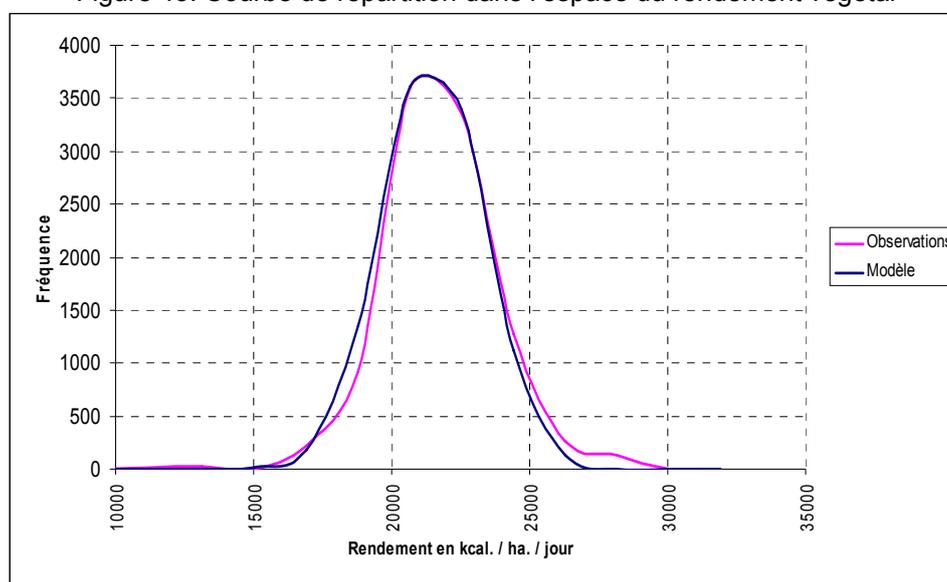
## 322. Ecriture du module dynamique

### 3221. Etape 1 – Modélisation des choix techniques et des modes de production

#### Etape 1.1 : Répartition du rendement végétal dans l'espace

La courbe de la Figure 43 illustre le point de départ de notre modélisation. Elle représente la répartition dans l'espace du rendement végétal maximum que les terres d'une région peuvent atteindre. Cette répartition continue des rendements peut être discrétisée afin d'obtenir des classes de terres aux rendements équivalents (voir ci-après). Cette courbe a ici été extrapolée pour le Brésil à partir de données françaises transmises par le LSCE<sup>80</sup>, puis ajustée à partir du rendement moyen brésilien (selon Agribiom, en 2001) à une loi Normale  $\mathcal{N}(21710,1840)$ , représentée en foncé sur la même figure.

Figure 43. Courbe de répartition dans l'espace du rendement végétal



Source : LSCE et Agribiom

Cette répartition pourra évoluer au cours du temps en fonction des conditions agro-écologiques : des modifications climatiques pourraient par exemple entraîner une augmentation de la fréquence des rendements bas ou élevés. Dans notre modèle, les modifications des conditions agro-écologiques sont exogènes - fournies par le modèle Orchidée du LSCE – et nous supposons que les choix techniques des exploitants agricoles s'effectuent à partir de cette courbe selon la méthode décrite en étape 1.2.

#### Etape 1.2 : détermination de la fonction de rendement végétal

Les choix techniques consistent à déterminer le rendement végétal qui minimise le coût unitaire de production pour chaque classe de terres  $i$ . Cette grandeur rapporte aux rendements, la somme par hectare du coût de la terre, des consommations intermédiaires énergétiques (engrais, matériel agricole...) et d'un coût divers (bâtiments, salaires...):

<sup>80</sup> A ce stade des travaux, et en l'absence de données détaillées sur les rendements, nous supposons que la courbe des rendements maximaux correspond à la courbe des rendements effectifs. Ce point sera précisé à l'avenir à partir des données transmises par le LSCE.

$$\text{CoûtUnit}(\rho_i) = \frac{\lambda + CIener(\rho_i) \cdot Pener + CDiv}{\rho_i} \quad (1)$$

où  $\lambda$  correspond à la valeur de la terre,  $\rho$  au rendement de la production végétale,  $CDiv$  au coût divers par hectare, et  $CIener$  et  $Pener$  respectivement aux consommations intermédiaires énergétiques par hectare et au prix de l'énergie.

En posant  $CIener = f_1(\rho_i)$ <sup>81</sup>, et en dérivant par rapport à  $\rho$ , on obtient :

$$\frac{d\text{CoûtUnit}(\rho_i)}{d\rho_i} = -\frac{(\lambda + CDiv)}{\rho_i^2} + \frac{(\rho f_1'(\rho_i) - f_1(\rho_i))}{\rho_i^2} \cdot Pener = 0$$

Ce qui se réécrit :

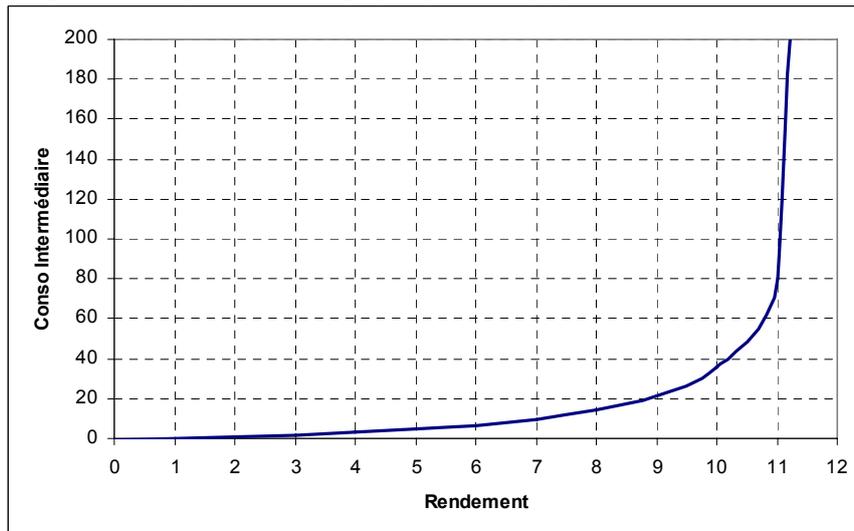
$$\rho_i f_1'(\rho_i) = f_1(\rho_i) + \frac{\lambda + CDiv}{Pener} \quad (2)$$

La fonction  $f_1(\rho_i)$  est supposée être de la forme suivante :

$$CIener = f_1(\rho_i) = \frac{a \cdot (\rho_i - \rho_{\min})}{(\rho_{\max}^i - \rho)} \quad (3)$$

Cette fonction reflète le fait que le rendement végétal est d'autant plus grand que les consommations intermédiaires sont élevées ( $f_1$  est donc croissante en  $\rho$ ). Cependant, pour une classe de terres donnée, il est impossible d'aller au-delà d'un certain rendement (noté  $\rho_{\max}^i$ ), même avec un accroissement très important de consommations intermédiaires énergétiques (d'où l'asymptote verticale sur la Figure 44). S'il existe  $\rho_{\max}^i$  un pour chaque classe de terres, on suppose en revanche que le rendement minimum – atteint sans aucun apport énergétique – est identique sur l'ensemble des terres.

Figure 44. Représentation graphique de  $f_1(\rho)$  pour une classe de terre



<sup>81</sup> La fonction  $f_1$  correspond à l'inverse de la fonction de production végétale, dont l'output est ici exprimé en calories / hectare. Ceci permet par conséquent de tenir compte de la contrainte de production dans le programme dual.

La dérivée de  $f_i$  par rapport à  $\rho$  est égale à :

$$f_i'(\rho_i) = a \cdot \frac{\rho_{\max}^i - \rho_{\min}}{(\rho_{\max}^i - \rho_i)^2}$$

En remplaçant  $f_i$  et  $f_i'$  par leur expression dans l'équation (2), on obtient :

$$\rho_i \cdot a \cdot \frac{\rho_{\max}^i - \rho_{\min}}{(\rho_{\max}^i - \rho_i)^2} - a \cdot \frac{(\rho_i - \rho_{\min})}{(\rho_{\max}^i - \rho_i)} = \frac{\lambda + CDiv}{Pener}$$

Ce qui se réécrit en une équation du second degré en  $\rho$  de la forme :

$$\rho_i^2 \left( a - \frac{\lambda + CDiv}{Pener} \right) + 2\rho_i \left( \left( \frac{\lambda + CDiv}{Pener} \right) \rho_{\max}^i - a\rho_{\min} \right) + \rho_{\min} \cdot \rho_{\max}^i - \frac{\lambda + CDiv}{Pener} \cdot \rho_{\max}^2 = 0 \quad (4)$$

Cette équation a pour solution :

$$\rho_i = \frac{-2 \left( \frac{\lambda + CDiv}{Pener} \rho_{\max}^i - a\rho_{\min} \right) \pm \sqrt{\Delta}}{2 \cdot \left( a - \frac{\lambda + CDiv}{Pener} \right)} \quad (5)$$

avec :

$$\Delta = 4 \cdot \left( \frac{\lambda + CDiv}{Pener} \rho_{\max}^i - a\rho_{\min} \right)^2 \cdot \rho_{\max}^2 - 4 \cdot \left( \frac{\lambda + CDiv}{Pener} \cdot \rho_{\max}^2 - \rho_{\min} \cdot \rho_{\max}^i \right) \cdot \left( a - \frac{\lambda + CDiv}{Pener} \right)$$

On obtient ainsi une expression de  $\rho$  en fonction de  $\lambda$  et du prix de l'énergie, qu'on note pour la classe de terres  $i$ ,  $g^i$  :

$$\rho_{veg} = g^i(\lambda, Pener) \quad (7)$$

Afin d'effectuer le calcul pour chacune des classes de terres, nous supposons qu'elles se caractérisent par un rendement maximal qui leur est possible d'atteindre. La distribution de ces rendements correspond à la courbe construite lors de la première étape. Cette courbe est discrétisée en un nombre donné d'intervalles qui coïncident chacun à une classe de terres. Nous disposons ainsi d'une distribution de  $\rho_{\max}^i$  qui permet d'opérer le calcul des  $g^i$  pour l'ensemble des classes de terres. La moyenne et la variance de la distribution des  $g^i$  sont ensuite calculées, et utilisées pour construire la distribution des rendements végétaux effectifs (c'est-à-dire des rendements végétaux qui découlent des choix techniques).

### Etape 1.3 : calcul des rendements de la production animal en extensif et intensif

Dans le cadre de notre modélisation, le rendement extensif  $\rho_{ext}$  (nombre de calories animales produites par hectare de pâture) est supposé être une constante pour chacune des 12 régions. A titre indicatif, selon Agribiom, ce rendement est égal à 142 kcal/ha/jour pour le Brésil<sup>82</sup>.

<sup>82</sup> Brésil 2001 : (28 Gkcal animales produites par jour sans FEED selon fonction de production animale M080615) / (197 millions d'hectares de pâtures)

Etant donné que l'alimentation animale provient essentiellement des cultures végétales (maïs, tourteaux...), on suppose que le rendement de la production animale intensive  $\rho_{int}$  est égal au rapport du rendement végétal  $\rho_{veg}$ , et d'un coefficient de transformation des calories végétales en calories animales  $\beta$ .

#### Etape 1.4 : répartition de la production animale entre intensif et extensif

La répartition de la production animale entre intensif et extensif résulte de la comparaison des coûts de production respectifs :

(a) En intensif, le coût de la production est égal au coût de la production végétale, constitué comme nous l'avons vu précédemment du coût de la terre, du coût des consommations énergétiques intermédiaires, et d'un coût divers. Cette dernière composante intègre ici un coût intangible lié à la modification des habitudes de production. Le coût divers dans le cas de la production animale intensive se distingue donc de celui de la production végétale, c'est pourquoi nous l'indiquons  $CDiv$ . Au total, rapportée au rendement végétal, cette expression est de la forme :

$$CoûtIntensif(\rho_i) = \frac{\beta}{\rho_{veg}^i} (\lambda + CIener(\rho_i) \cdot P ener + CDivInt) \quad (6)$$

(b) En extensif, le coût de production découle directement de la valeur de la terre. Par unité de calorie produite, il est égal à :

$$CoûtExtensif = \frac{\lambda}{\rho_{ext}} \quad (7)$$

Ainsi, la production se fera en mode intensif dès lors son coût est inférieur à celui de la production extensive, soit :

$$\frac{\beta}{\rho_{veg}^i} (\lambda + CIener(\rho_i) \cdot P ener + CDivInt) < \frac{\lambda}{\rho_{ext}} \quad (8)$$

En isolant le rendement végétal, cette expression se réécrit de la façon suivante :

$$\frac{\lambda}{\rho_{ext}} \rho_i^2 + (a\beta \cdot P ener - \lambda \cdot \frac{\rho_{max}^i}{\rho_{ext}} - CDivInt \cdot \beta - \beta \cdot \lambda) \cdot \rho_i + \beta \cdot (\lambda \cdot \rho_{max}^i - a\rho_{min} P ener + CDivInt \cdot \rho_{max}^i) < 0 \quad (9)$$

Cette inéquation est vérifiée pour tout  $\rho_{veg}$  compris entre les racines du polynôme du second degré du membre de gauche, notées  $\rho_1$  et  $\rho_2$ . En d'autres termes, la part de la production intensive dans la production total – notée  $PartFeed$  – est égale à :

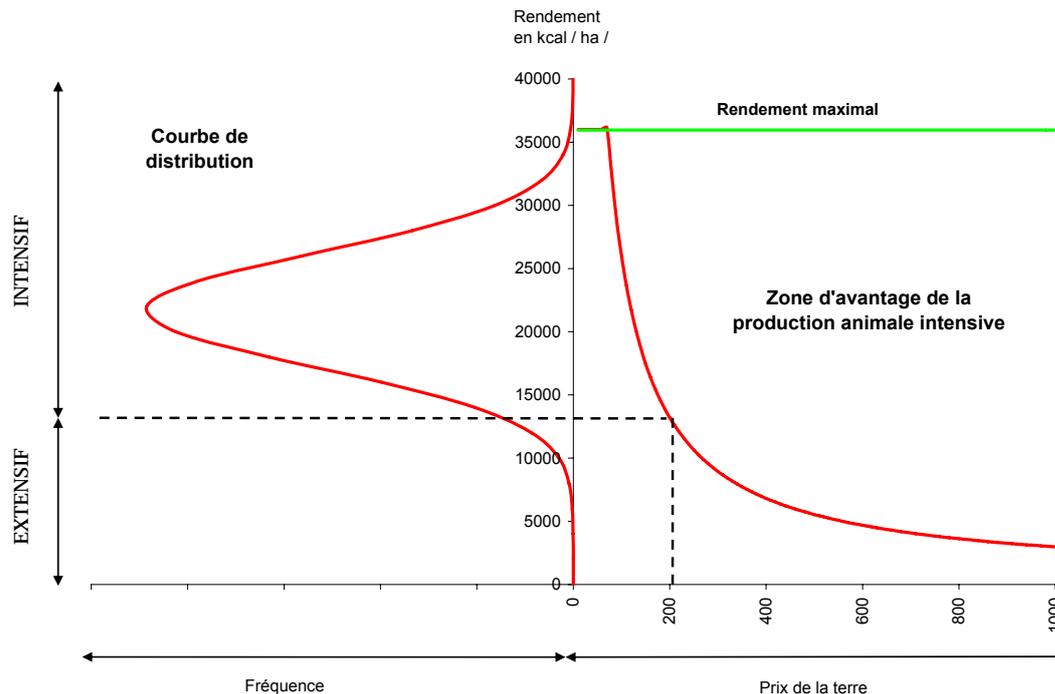
$$PartFeed(\lambda) = P(\rho_2 < \rho_{veg} < \rho_1) \quad (10)$$

Cette probabilité peut facilement être calculée, puisque la fonction de distribution du rendement végétal a été construite en étape 1.2. En posant  $m$ , la moyenne des rendements végétaux obtenue, et  $\sigma$  leur variance, cette fonction suit une  $\mathcal{N}(m, \sigma)$ . Par conséquent, la fonction  $PartFeed$  peut s'écrire de la façon suivante :

$$PartFeed(\lambda) = \int_{\rho_1}^{\rho_2} \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right) dx \quad (11)$$

La courbe du cadran de droite de la Figure 45 représente l'inéquation (9). Pour une valeur de la terre donnée, cette courbe renvoie sur l'axe des ordonnées le rendement végétal à partir duquel la production intensive devient plus avantageuse que la production extensive. La courbe du cadran de gauche de la Figure 45 représente la fonction de distribution du rendement végétal effectif calculée en étape 1.2 (Figure 43). Ainsi, pour une valeur de la terre donnée, il est possible de déduire à partir des deux courbes ci-dessous, la proportion de terres sur lesquelles il est plus avantageux de faire du FEED que du pâturage.

Figure 45. Description du mode de répartition de la production animale entre intensif et extensif



A ce stade, pour leur décision de modes de production animale, les exploitants agricoles sont supposés n'avoir accès qu'aux terres de la région sur laquelle ils cultivent. Ils n'ont donc pas la possibilité d'acheter du FEED. A terme, il sera nécessaire d'envisager le cas où l'importation d'alimentation animale d'autres régions du Monde serait possible.

### 3222. Etape 2 – Modélisation de la demande

#### Etape 2.1 : détermination de la demande totale de calories alimentaires

La demande alimentaire (exprimée en calorie) est une fonction croissante du PIB et de la population :

$$DC_{alim} = f_2(PIB, pop) \quad (12)$$

(cal)

Afin de traduire le fait que la consommation de calories par personne ne peut dépasser un certain seuil, on suppose que  $f_2$  est une fonction arctangente. Dans certains cas, la demande

alimentaire pourra également découler d'un scénario exogène, comme c'est le cas pour la simulation effectuée ci-après. Dans tous les cas, comme déjà annoncé, la demande de calories alimentaires est supposée inélastique aux prix des biens agricoles.

#### Etape 2.2 : détermination de la demande de calories végétales alimentaires

La part des produits animaux dans la consommation totale de nourriture ( $Part_{Animal/CalTot}$ ) est fixée soit de façon exogène, soit en fonction d'un scénario. Ceci permet de calculer la demande de calories animales :

$$DC_{calanim} = Part_{Animal/CalTot} \cdot DC_{calim} \quad (13)$$

(cal)                      (%)                      (cal.)

De même, la demande de calories végétales à usage humain est égale à :

$$DC_{calvég} = (1 - Part_{Animal/CalTot}) \cdot DC_{calim} \quad (14)$$

(cal)                      (%)                      (cal.)

Afin de reconstituer la demande totale de calories végétales, il faut ajouter à la demande de calories à usage humain, la demande à usage animal. Cette dernière est égale à la part de la demande de calories animales issue de la production intensive, résultant des choix de modes de production décrits dans l'étape 1 ( $PartFeed$ ), multipliée par le coefficient  $\beta$  de transformation des calories végétales en calories animales :

$$D_{Tcalvég} = [DC_{calvég} + \beta \cdot DC_{calanim} \cdot PartFeed](1 + seeds + waste) \quad (15)$$

(cal)                      (cal)                      (calanim/calveg)                      (calanim.)                      (%)                      (%)                      (%)                      (%)

Les volumes de semences et de déchets ( $seeds$  et  $waste$ ) sont ici exprimés en proportion des volumes à produire. Ils sont considérés comme une composante de la demande totale de calories végétales, venant s'ajouter aux demandes de calories effectivement consommées.

#### Etape 2.3 : Calcul de la demande de surfaces alimentaires à partir de la demande de calories végétales et animales, et des rendements

La demande totale de surface à usage alimentaire est égale au rapport entre les demandes de calories des productions végétales et animales en élevage extensif et les rendements respectifs, soit :

$$DS_{alim} = I / \rho'_{vég} \times D_{Tcalvég} + I / \rho_{ext} \times DC_{calanim} (1 - PartFeed) \quad (16)$$

(ha)                      (ha. / cal.)                      (cal.)                      (ha. / cal.)                      (cal.)                      (%)

Pour déterminer la demande de surface pour la production végétale, nous recalculons le rendement végétal en ne tenant compte que des terres dédiées à cette production. En d'autres termes, nous retranchons du volume total de terres arables – dont la distribution du rendement maximum est indiqué en Figure 43 – les terres déjà utilisées pour la production animale extensive. Nous obtenons ainsi le rendement  $\rho'_{vég}$ , légèrement supérieur au rendement végétal calculé en étape 1.2 ( $\rho_{vég}$ ) puisqu'il ne tient plus compte des terres dédiées au pâturage, supposées être les moins fertiles dans notre modèle.



La valeur de la terre  $\lambda$  est l'unique variable de cette équation. La résolution de cette équation permet de boucler le modèle.

### **33. Analyse des sorties du modèle**

Ainsi que nous l'avons précisé au cours de ce rapport, le modèle que nous présentons est encore dans la première phase de développement. Les résultats présentés transcrivent donc directement les expériences et les tâtonnements qui caractérisent toute innovation de modélisation. L'objectif de cette partie est essentiellement de tester la sensibilité du modèle à l'évolution des différentes variables. Un premier exercice de projection est également présenté pour exposer les potentialités du modèle, avec des données calibrées sur le Brésil. Compte tenu des travaux qu'il reste à mener, la valeur de ces résultats est principalement illustrative du type d'information que fournira le modèle.

#### *331. Tests de sensibilité*

Afin de vérifier le bon comportement du modèle et d'acquérir une connaissance précise de la sensibilité des résultats aux paramètres des différentes équations, un test de sensibilité sur le prix de l'énergie a été réalisé. Cette section en présente les principaux résultats.

A l'état initial, les principales fonctions du modèle sont représentées sur les graphiques de la Figure 46. Une répartition des rendements sur chaque classe de terres (graph 1a) est d'abord calculée à partir du programme de minimisation du coût de la production végétale décrit précédemment. La forme de cette répartition nous renseigne sur les choix d'intensification : une distribution centrée sur les hauts rendements témoigne d'une production intensive en intrants énergétiques. Dans notre simulation, le prix de l'énergie est assez élevé (100\$/baril), et la disponibilité des terres grande. Le degré d'intensification de la production végétale s'établit par conséquent à un niveau relativement faible d'environ 10 400 kcal/ha en moyenne. Le graph 2a décrit les choix d'intensification de la production animale pour tout niveau de valeur de terre. Lorsque la valeur de la terre est faible (inférieur à 80\$/ha), la production animale est entièrement extensive, et le bétail se nourrit uniquement au travers du pâturage. Au-delà, la part de FEED dans l'alimentation animale s'accroît progressivement pour atteindre 100% lorsque la valeur de la terre est d'environ 160\$/ha. La valeur de terre d'équilibre est fournie par le point de rencontre des courbes d'offre<sup>84</sup> et de demande de terres (graph 3a). En reportant cette valeur sur le graph 2 (voir traits en pointillés), on obtient que la proportion optimale de FEED dans l'alimentation animale est d'environ 40%.

En faisant varier le prix de l'énergie de 10 à 200\$/baril (Figure 47), on constate – conformément à l'intuition – que la distribution des rendements déterminés pour chacune des classes de terres se déplace vers la gauche (graph 1b) : les exploitants préfèrent consommer de la terre plutôt que des intrants énergétiques, dont le coût relatif s'accroît avec la hausse du prix de l'énergie, et choisissent par conséquent des rendements plus faibles. Le rendement moyen passe ainsi d'environ 16 000 kcal/ha à environ 6 000. L'écart-type de la distribution diminue également puisque la hausse du prix de l'énergie concentre les rendements au

---

<sup>84</sup> Sur le graphique, cette courbe d'offre n'est qu'illustrative : sa forme doit être précisée, qu'il s'agisse de sa pente ou de son asymptote horizontale (qui se situe très probablement au-delà des 300 millions d'ha pour le Brésil).

voisinage du rendement minimum, fixé ici arbitrairement à 100 kcal/ha pour l'ensemble des terres. Pour les mêmes raisons, la courbe d'intensification de la production animale se déplace logiquement vers la droite à mesure que le prix de l'énergie augmente (graph 2b) : l'introduction de FEED, dont la production nécessite l'utilisation d'intrants énergétiques, dans l'alimentation animale ne devient intéressante qu'à partir de valeurs de terre de plus en plus élevées. En raison de l'extensification de la production agricole, qu'elle soit végétale ou animale, la demande de terres augmente sensiblement (graph 3b, avec le déplacement vers la droite de sa courbe). L'offre de terres étant invariante au prix de l'énergie, l'accroissement de la demande se répercute directement sur la valeur de la terre, qui passe d'environ 70\$/ha à 300\$/ha. La hausse du prix de l'énergie ne se répercute donc que partiellement sur celui de la terre, puisqu'une multiplication par 20 de son prix n'implique qu'une multiplication par 4 de celui de la terre (graph 4b).

Figure 46. Principales fonctions du modèle à l'état initial

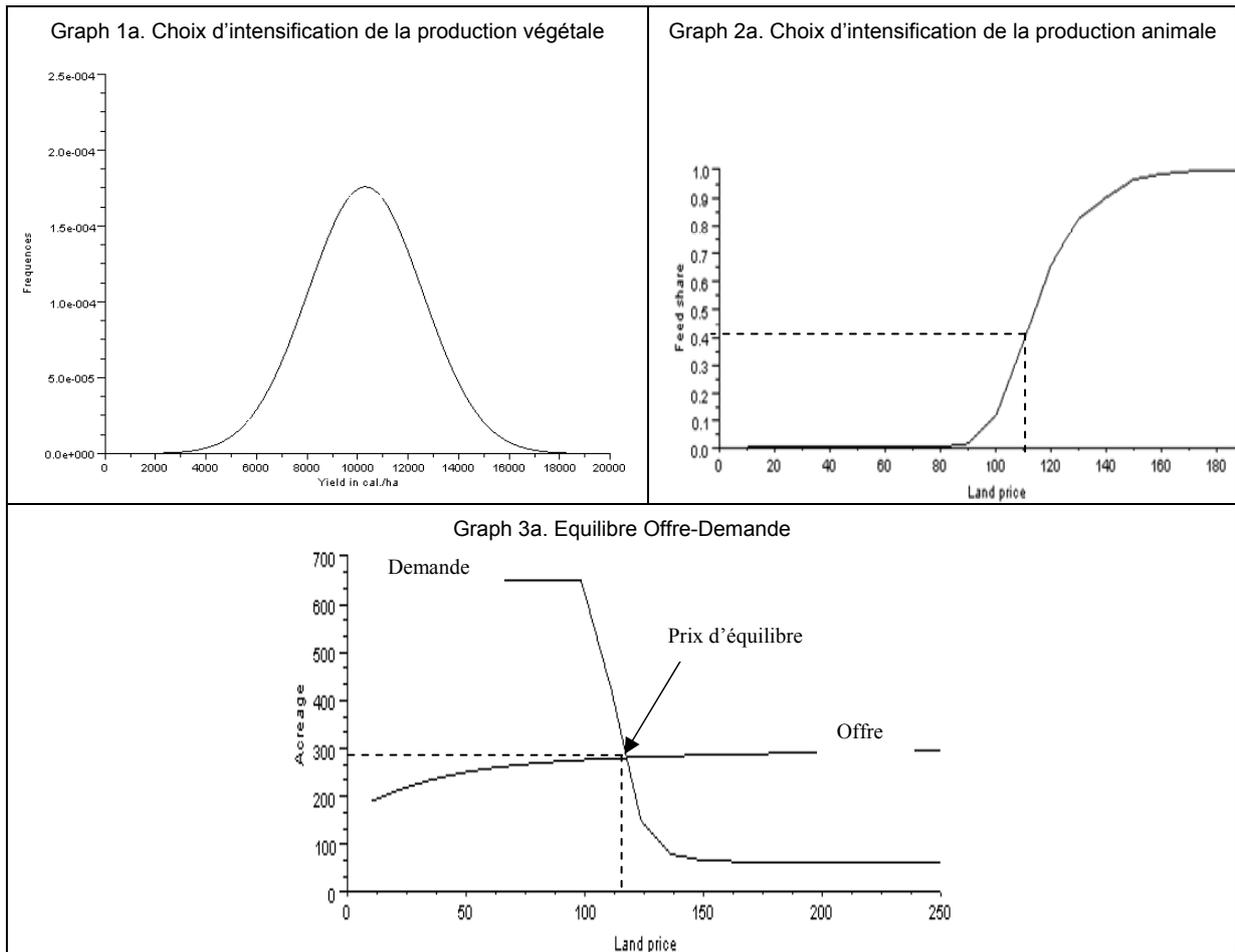
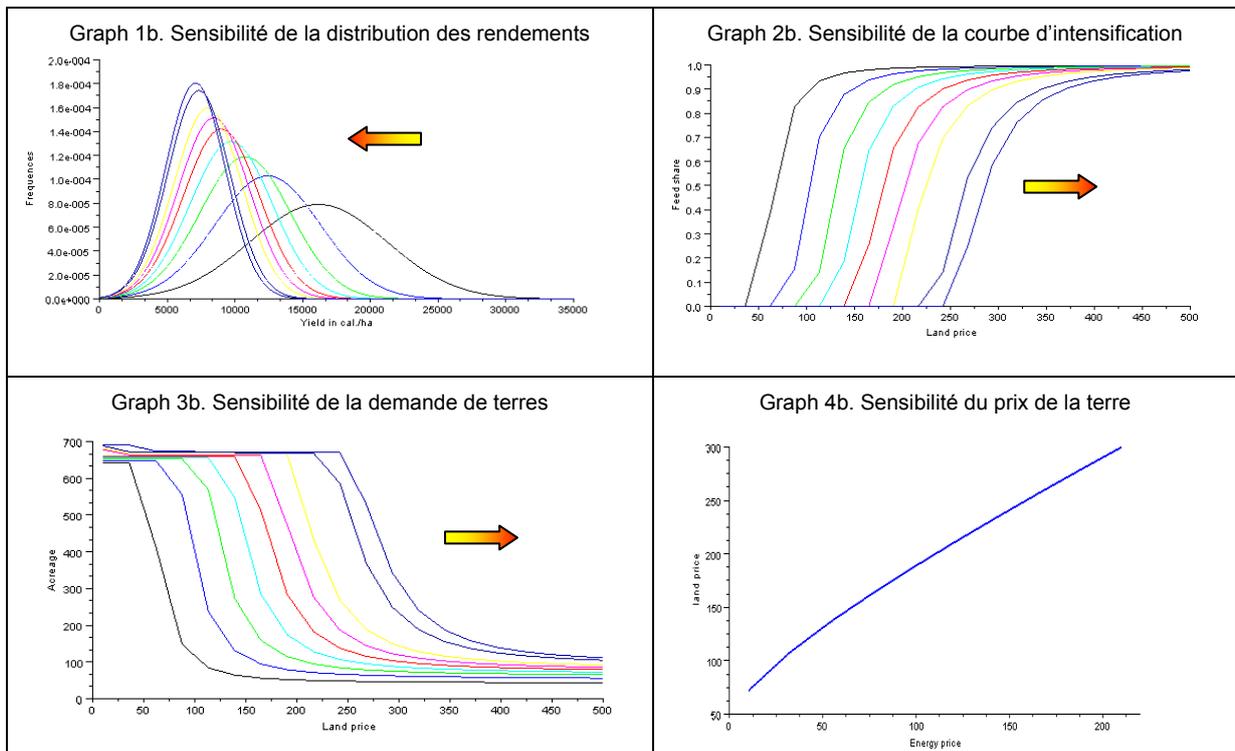


Figure 47. Sensibilité du modèle à une variation du prix de l'énergie



### 332. Résultats d'un premier exercice de projection

#### 3331. Hypothèses de projection

Dans cette dernière section, nous présentons une première série de résultats du Nexus-LandUse, issue d'un exercice de simulation effectuée pour le cas du Brésil sur la période 2001-2050. Cette simulation repose sur le scénario « Agrimonde GO » décrit dans la seconde partie de ce rapport. Pour rappel, ce scénario suppose une augmentation de la ration calorique de 3125 kcal/jour/personne au début des années 2000 à 3650 kcal/jour/personne en 2050 (Annexe 13). La composition de cette ration évolue également au cours de la période avec un accroissement de la part de l'alimentation animale, qui passe de 15,9% de la consommation calorique à 24,4%. La population totale du Brésil passe quant à elle de 176 millions d'habitants en 2001 à 253 millions en 2050.

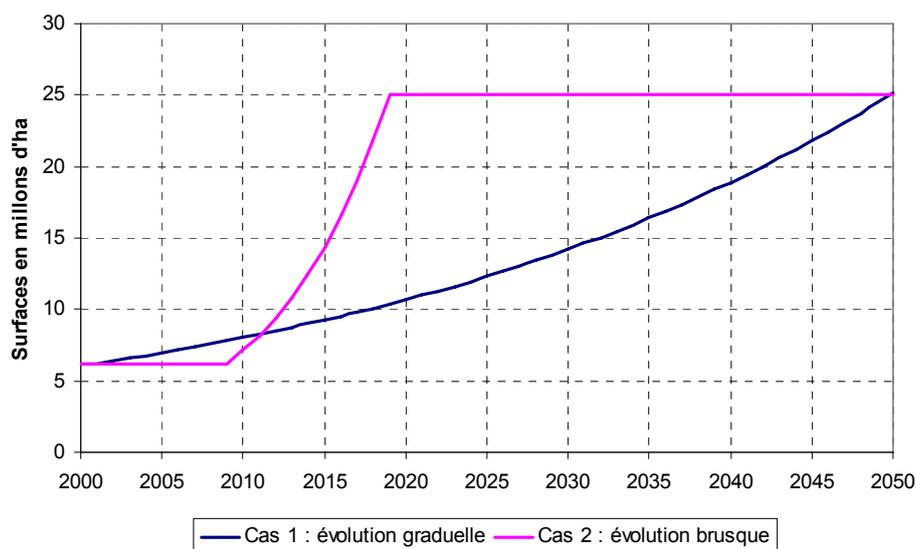
Afin d'analyser les conséquences de la production de biocarburants en termes de changements d'usages des sols, 2 cas polaires sont envisagés (Figure 48) :

(a) Un premier dans lequel les surfaces dédiées aux biocarburants augmentent de 3% par an jusqu'en 2050. Ce qui équivaut à un quasi triplement de la surface de biocarburants d'ici 2050 (de 6,2 Mha à environ 25 Mha). Ce cas correspond à une évolution progressive de la production de biocarburants ;

(b) Une seconde variante dans laquelle les surfaces dédiées aux biocarburants sont stables jusqu'en 2010, puis augmentent brusquement entre 2010-2020 : en l'espace de 10 ans, elles rejoignent le niveau atteint au bout de 49 ans dans le premier scénario, soit environ 25 Mha. Les surfaces dédiées aux biocarburants se stabilisent ensuite ce niveau jusqu'en 2050.

Ces deux variantes seront comparées à un scénario de référence dans lequel les surfaces de biocarburants restent constantes à 6,2 Mha sur toute la période de projection.

Figure 48. Evolution de la surface agricole dédiée aux biocarburants selon 2 variantes (2001-2050)



Les deux variantes avec intégration de biocarburants ne projettent qu'un accroissement d'environ 7 points de la surface de biocarburants<sup>85</sup> dans le total des surfaces cultivées : selon notre scénario, la proportion de surface dédiée aux biocarburants passe ainsi de 2% à 9% en 2020 dans le scénario rapide, et en 2050 dans le scénario lent.

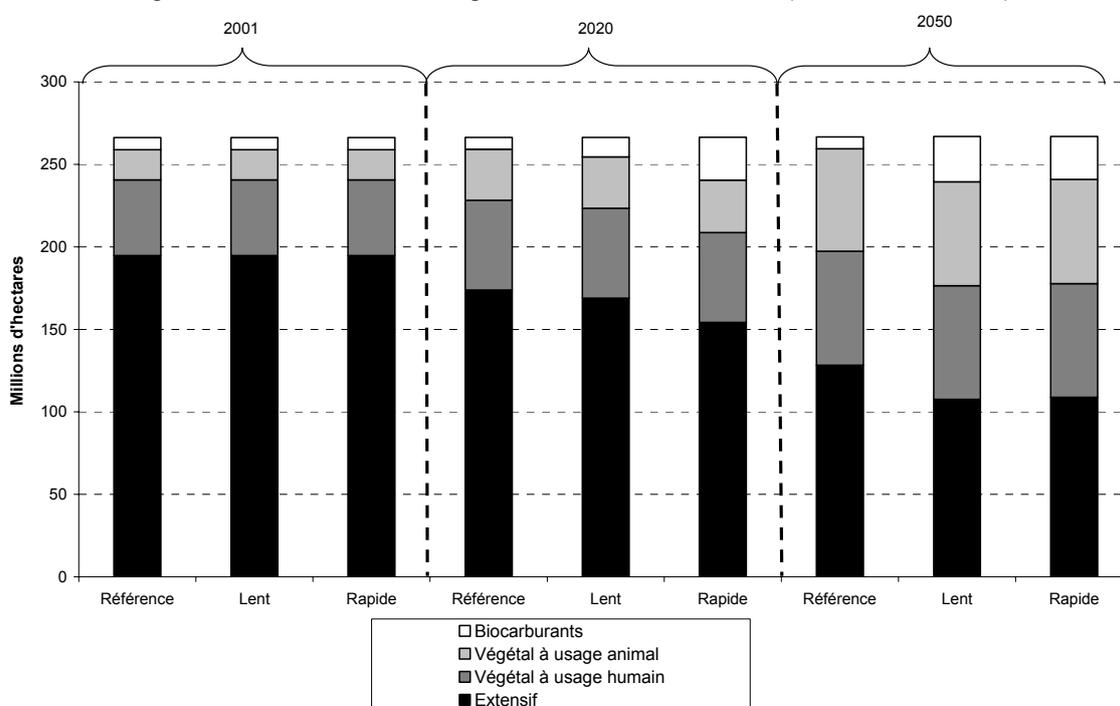
La simulation est calée sur la répartition des usages des sols observées en 2001, qui se décompose de la façon suivante selon Agribiom : 197 Mha de pâtures (production animale extensive) et 66 Mha de cultures, dont 6,2 Mha dédiées aux biocarburants et 1 Mha d'hectare aux autres cultures non-alimentaires (coton...). Selon la même source, le Brésil utilise l'équivalent d'environ 24 Mha de cultures pour l'alimentation animale<sup>86</sup>.

### 3332. Analyse des sorties

Il ressort en premier lieu des simulations que notre modèle semble reconstituer correctement le partage de la production végétale entre alimentation humaine et animale : selon nos résultats, 18,36 Mha sont dédiées à la production d'alimentation animale (Figure 49), ce qui apparaît cohérent avec l'estimation effectuée précédemment.

Il convient également de noter que le rendement végétal moyen calculé par notre modèle est très inférieur à celui observé en réalité (environ 10400 kcal / ha contre 21710 kcal / ha). Ceci s'explique par le fait qu'en l'absence de commerce international, l'agriculture brésilienne ne fait face qu'à sa propre demande alimentaire. Le Brésil étant un très gros exportateur agricole, la demande que nous reproduisons dans notre modèle est très inférieure à celle qui est effectivement adressée au secteur agricole brésilien, et la nécessité d'intensifier la production est par conséquent beaucoup moins grande.

Figure 49. Evolution des usages sols selon 3 variantes (2001, 2020, 2050)



<sup>85</sup> Elles représentent environ 2% des surfaces cultivées en 2001, contre 9% en 2050 dans le cas de la variante lente ou en 2020 dans celui de la variante rapide.

<sup>86</sup> 538 Gkcal/jour divisés par le rendement moyen de 21 710 kcal/jour en 2001

Dans le scénario de référence, le volume total des surfaces cultivées augmente de 0,2% sur l'ensemble de la période de projection, tandis que dans les deux variantes avec intégration des biocarburants, le volume total des terres mises en culture augmente de 0,3%. Ces faibles évolutions des surfaces agricoles sont très probablement liées à la forme de notre fonction d'offre de terres, qui, comme nous l'avons souligné précédemment, doit être raffinée.

Compte tenu de la faible élasticité de l'offre de terres propre à notre modèle, l'évolution de la demande alimentaire et non alimentaire est satisfaite au travers de l'intensification de la production. S'agissant de la production végétale, l'intensification n'évolue que modérément : dans le scénario de référence, le rendement moyen augmente de 1,6% sur la période, et de 1,8% dans les deux variantes biocarburants (Figure 51). C'est donc au travers de la production animale que s'effectue l'essentiel de l'intensification : le volume des surfaces dédiées à l'extensif diminue de plus de 30% dans le scénario de référence, et de plus de 40% dans les variantes biocarburants. Pour compenser cette baisse, les surfaces dédiées à la production d'alimentation animale augmentent de 240% dans le scénario de référence, et de 245% dans les scénarios alternatifs.

Figure 50. Evolution du indice de rareté de la terre selon 3 variantes (2001-2050)

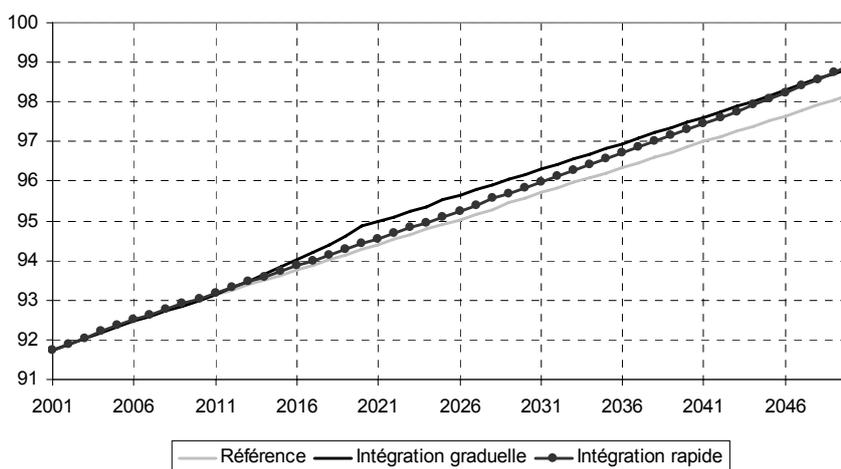
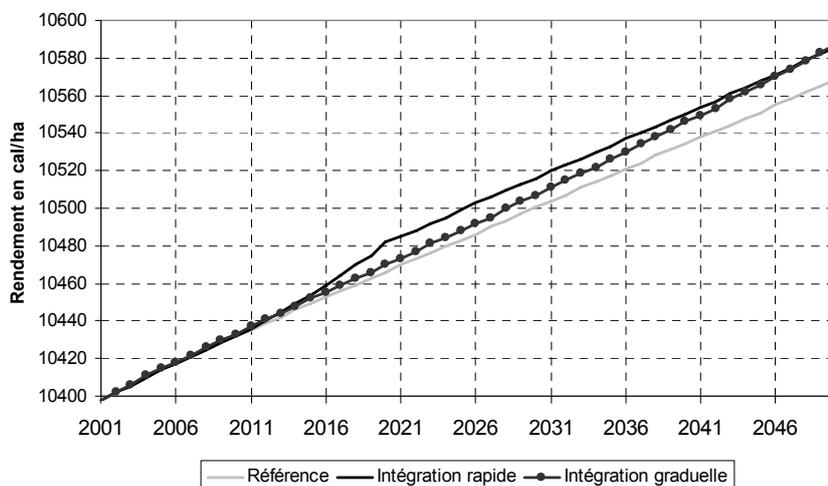


Figure 51. Evolution du rendement moyen selon 3 variantes (2001-2050)



Parallèlement la valeur de la terre augmente d'environ 7% dans le scénario de référence, et d'environ 8% dans les deux variantes. L'analyse de la dynamique de la valeur de la terre selon les deux scénarios d'intégration des biocarburants – graduel et rapide – révèle que l'augmentation brusque des surfaces dédiées aux biocarburants dans le second scénario accroît, comme on pouvait le penser, la pression sur la terre (Figure 50). On observe un décalage d'environ 4 ans entre le moment où les surfaces de biocarburants commencent à augmenter (2010), et celui où la valeur de la terre s'accroît plus significativement (2014) : le stock de terres consacrées aux biocarburants étant initialement faible par rapport au stock de terres cultivées, l'augmentation de 15% par an des surfaces de biocarburants ne représente qu'une faible évolution en volume sur les premières années. Ceci explique que son impact ne soit pas directement visible sur la valeur de la terre.

La Figure 51 confirme que le rendement végétal moyen présente une dynamique tout à fait similaire à celle de la valeur de la terre, et que cette variable réagit de façon adéquate aux évolutions de la rareté relative de la terre. L'augmentation du rendement végétal, appliquée à une surface de taille croissante, du fait de la réduction des surfaces de pâturages au profit des cultures destinées à d'alimentation animale, implique une consommation accrue d'énergie – en engrais, et en carburant pour les machines agricoles. Les résultats de notre modèle nous permettent d'estimer que les consommations d'énergies augmentent d'environ 30% dans le scénario de référence, et d'environ 33% dans les variantes d'intégration des biocarburants.

### **34. Conclusions**

Une fois rendu entièrement opérationnel, et après l'importante et nécessaire intégration du commerce international, notre modèle permettra d'aborder – entre autres – deux problématiques connexes liées à l'atténuation du changement climatique.

La première concerne le potentiel d'intensification de la production agricole. Selon les conclusions de John M. Reilly se fondant sur les résultats du modèle de projection E.P.P.A. développé par le M.I.T., des marges importantes d'intensification existent, et sont susceptibles d'atténuer significativement la pression sur la terre. Au travers de notre indicateur de rareté de la terre, notre modèle sera en mesure d'analyser cette question sous un jour nouveau, et de préciser dans quelles conditions l'augmentation de la demande alimentaire et bioénergétique passe par une intensification ou une déforestation accrue.

La seconde problématique a trait aux changements indirects d'usages des sols (ILUC en anglais) liés au développement des biocarburants. En quelques années, ce sujet est devenu saillant, tous spécialement en Europe. La directive relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, adoptée en 2009 par les instances européennes, insiste ainsi sur la nécessité d'inclure les émissions liées aux changements indirects d'utilisation des sols<sup>87</sup> dans l'évaluation des incidences environnementales de la production et de la consommation de biocarburants. A cet égard, il a un temps été proposé d'introduire un facteur « ILUC » sous forme de pénalité dans la méthodologie d'évaluation des émissions de gaz à effet de serre des biocarburants<sup>88</sup> (méthodologie de type ACV). Dans le cadre des objectifs de développement des biocarburants, exprimés en termes de volumes produits et de niveau de GES réduit, l'introduction d'un tel paramètre pourrait avoir de fortes répercussions sur les stratégies nationales agricoles et énergétiques, ce que pourrait à terme aussi explorer notre modèle.

---

<sup>87</sup> Cette expression recouvre les changements d'affectation des terres qui se produisent en-dehors du périmètre de production d'un certain type de biomasse, et qui résultent d'une modification dans l'utilisation ou dans le volume de production de cette biomasse.

<sup>88</sup> La Directive adoptée en 2009 par le Parlement et le Conseil Européens va finalement moins loin, puisque seul un rapport « sur l'impact du changement indirect d'affectation des sols sur les émissions de gaz à effet de serre et sur les moyens de réduire cet impact au minimum » est réclamé auprès de la Commission. Ce rapport doit s'accompagner, le cas échéant, « d'une proposition s'appuyant sur les meilleures preuves scientifiques disponibles, contenant une méthodologie concrète à appliquer aux émissions découlant des changements survenus dans les stocks de carbone en raison de changements indirects d'affectation des sols ».

# ***ANNEXES***

## **Annexe 1. Le modèle-ingénieur Agropol**

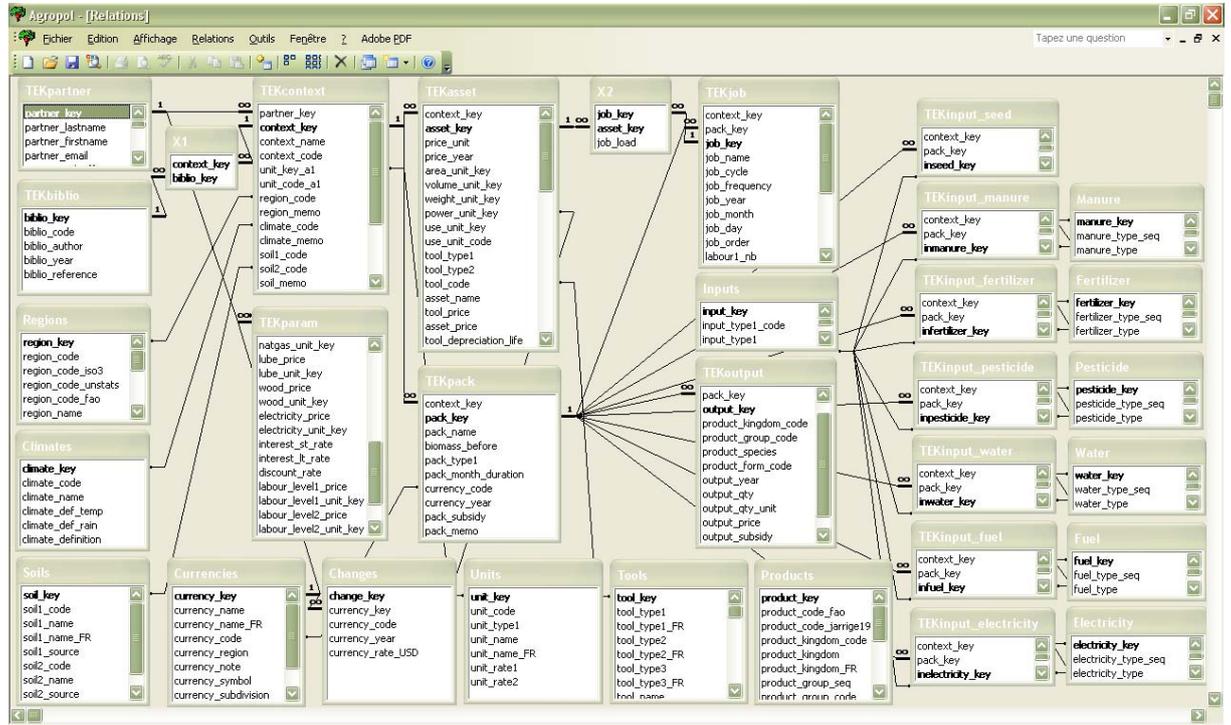
### **AGROPOL**

**A tool for assessing  
economical costs and ecological footprints  
of agro-techniques**

**Bruno DORIN**  
([bruno.dorin@cirad.fr](mailto:bruno.dorin@cirad.fr))

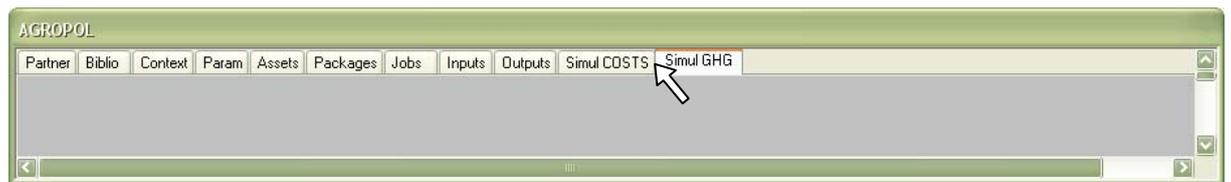
Agropol is a friendly-user interface built with Microsoft Office Access 2003 in order to manage data of various origins for various outputs. The organisation of these data into databases, as well as connections established between these data, are not user-friendly since it looks like something like this:

Data organisation



Screens

Above all databases, connections, equations and code (Sql and Visual basic), the current Agropol interface has 10 operational screens which are alternatively emulated by a click on their names ("Partner", "Biblio", etc.) located on the top part of the Agropol window (see below). Some screens can not be emulated (grey colour screen) until some compulsory information are selected on other screens.



Buttons /

The main buttons/icons of commands present on Agropol screens are the following ones:



for "Delete a record"



for "Duplicate a record"



for "Add a new record"

Other buttons/icons will be extended or added in future Agropol versions, like:



for "Print a report of the information mentioned on screen"



for "Export data/results to Excel"

A big effort of Agropol is to be not only a bilingual interface (English/French), but also a multi-unit environment: every value can be keyboarded or converted in the unit of his/her choice. The choices within each type of unit are, potentially, the following ones (default unit in grey colour):

## Area ▼

m2	meter ^2	mètre ^2
A	acre	Acre
Ha	hectare	Hectare
km2	kilometer ^2	kilomètre ^2
ft2	foot ^2	pied ^2

## Distance ▼

mm	millimeter	millimètre
cm	centimeter	centimètre
inc	inch	pouce
dm	decimetre	décimètre
ft	foot	pied
yd	yard	yard
m	meter	mètre
km	kilometer	kilomètre
mile	mile	mile
nm	mile (nautical)	mile (nautic)

## Volume ▼

cm3	centimeter ^3	centimètre ^3
inc3	inch ^3	pouce ^3
l	litre	Litre
gal	gallon (US)	gallon américain
gali	gallon (imperial)	gallon impérial
ft3	foot ^3	pied ^3
hl	hectolitre	Hectolitre
m3	metre ^3	mètre ^3
bbl	barrel	Baril
yd3	yard ^3	yard ^3

## Weight ▼

gr	gramme	gramme
oz	ounce	once
lb	pound	livre
kg	kilogramme	kilogramme
q	quintal	quintal
Imp	short ton	tonne américaine
t	metric ton	tonne

## Unit ▼

U	unit	Unité
Ku	thousand units	millier d'unités
Mu	million units	million d'unités
Gu	billion units	milliard d'unités

## Time ▼

hr	hour	heure
day	day	jour
week	week	semaine
mont	month	mois
yr	year	année

## Energy ▼

cal	calorie	Calorie
kcal	calorie (diet)	calorie (alimentaire)
j	joule	Joule
kJ	kilo joule	kilo joule
btu	British thermal unit	Btu
mj	mega joule	mega joule
kwh	kilowatt-hour	kilowatt-heure
ther	therm	Therm
gj	giga joule	giga joule
tce	ton coal equivalent	tonne equivalent charbon
toe	ton oil equivalent	tonne équivalent pétrole
bboe	barrel oil equivalent	baril de pétrole

## Power ▼

w	watt	watt
hpdin	horse power (metric)	cheval vapeur (DIN)
hp	horse power (UK,US)	horse power
kw	kilo watt	kilo watt

## GHG ▼

ce	C equivalent	C équivalent
co2e	CO2 equivalent	CO2 équivalent
ch4e	CH4 equivalent	CH4 équivalent
n2oe	N2O equivalent	N2O équivalent

## Rate ▼

ppm	part per million	partie par million
o/oo	per thousand	pour mille
o/o	percentage	pourcentage

Agropol also offers a multi-currency environment not only for data entry but also to facilitate comparisons of results between a region to another (costs, margins...). In the current Agropol version, 220 currencies are potentially available with their respective ISO-4217 code, but only 27 are currently displayed (see below): those for which we have compiled their annual exchange rate toward the dollar, from 1948 up to 2005 (PACIFIC, 2006). In this respect, when a monetary value (e.g. 34 000 EUR2004) is converted with Agropol into another one by a simple click (e.g. 45 893 EUR2000, or 77 216 BRL2000, or 42 196 USD2000...), it only indicates the value in US Dollars converted with the concerned exchange rate of the concerned year. In other words, local inflation rates are not taken into account here, and the USD exchange rate is always 1 from 1948 to 2005.

Currency ▼			
ATS	Schilling (Austrian)	Schilling (autrichien)	Austria [AT]
AUD	Dollar (Australian)	Dollar (australien)	Australia [AU], Christmas Island [CX], Cocos (Keeling) Islands [CC], Heard and McDonald Islan
BEF	Franc (Belgian)	Franc (belge)	Belgium [BE]
BRL	Real (Brazilian)	Real (brésilien)	Brazil [BR]
CAD	Dollar (Canadian)	Dollar (canadien)	Canada [CA]
CHF	Franc (Swiss)	Franc (suisse)	Liechtenstein [LI], Switzerland [CH]
DEM	Mark (Deutsche)	Mark (allemand)	Germany (West and East) [DE]
DKK	Krone (Danish)	Couronne (danoise)	Denmark [DK], Faroe Islands [FO], Greenland [GL]
ESP	Peseta (Spanish)	Peseta (espagnole)	Andorra [AD], Spain [ES], Western Sahara [EH]
EUR	Euro	Euro	Austria [AT], Belgium [BE], Finland [FI], France [FR], Germany [DE], Greece [GR], Ireland [IE]
FIM	Markka (Finnish)	Markka (finlandaise)	Finland [FI]
FRF	Franc (French)	Franc (français)	Andorra [AD], France [FR], French Guiana [GF], French Southern and Antarctic Territories [TF]
GBP	Pound (Sterling)	Livre (sterling)	British Indian Ocean Territory [IO], British Virgin Islands [VG], South Georgia and the South Sa
HKD	Dollar (Hong Kong)	Dollar (Hong Kong)	Hong Kong [HK]
IDR	Rupiah (Indonesian)	Rupiah (indonésienne)	Indonesia [ID]
INR	Rupee (Indian)	Roupie (indienne)	Bhutan [BT], India [IN]
ITL	Lira (Italian)	Lire (italienne)	Holy See (Vatican City State) [VA], Italy [IT], San Marino [SM]
JPY	Yen (Japanese)	Yen (japonais)	Japan [JP]
NOK	Krone (Norwegian)	Couronne (norvégienne)	Antarctica [AQ], Bouvet Island [BV], Norway [NO], Svalbard and Jan Mayen Islands [SJ]
NZD	Dollar (New Zealand)	Dollar (néo zélandais)	Cook Islands [CK], New Zealand [NZ], Niue [NU], Pitcairn Island [PN], Tokelau [TK]
PHP	Peso (Philippines)	Peso (philippin)	Philippines [PH]
PKR	Rupee (Pakistani)	Roupie (pakistanaise)	Pakistan [PK]
PTE	Escudo (Portuguese)	Escudo (portugais)	Portugal [PT]
SEK	Krona (Swedish)	Couronne (suédoise)	Sweden [SE]
SGD	Dollar (Singapore)	Dollar (sigapourien)	Singapore [SG]
THB	Baht (Thai)	Baht (thailandais)	Thailand [TH]
USD	Dollar (US)	Dollar (américain)	American Samoa [AS], British Virgin Islands [VG], Ecuador [EC], Federated States of Micronesi

## Aims

Agropol's one ambitions is to be used for gathering data on agricultural and forestry practices all over the world, and later to offer to those who participate in the project a unique database for vary various kinds of analyses at the micro- or macro-levels, in the technical, economical and/or environmental fields. The aim of this screen 01 is to clearly identified the providers of data (a person along with its organisation if any), not only to fully recognise a work of key importance in spite of its unfortunate low-rate in certain arena (scholar world especially, where progresses in models or theories are far better rewarded), but also to allow future exchanges with data providers for questions or clarifications, and later for their access to other Agropol data. In other words, the function of this screen 01 is to establish rights on and traceability of the data. This screen will undoubtedly be improved in future Agropol's versions.

## Visual aspect and screen sections

The screenshot shows the AGROPOL software interface. At the top, there is a menu bar with options: Partner, Biblio, Context, Param, Assets, Packages, Jobs, Inputs, Outputs, Simul COSTS, Simul GHG. Below the menu, a search bar contains 'DORIN Bruno'. The main content area is titled 'DATA ENTRY / CLAIM' and contains a form with the following fields:

Lastname	Firstname	
DORIN	Bruno	
Tel office +33 (4) 67 61 75 82	Tel home +33 (4) 67 64 64 81	Tel mobile +33 (6) 03 03 43 20
Email bruno.dorin@cirad.fr	Postal address 57 rue de l'Acropole 34000 Montpellier France	

Below this is the 'ALLIED ORGANISATION' section:

Name	Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement	
Acronym	CIRAD	
Webpage	www.cirad.fr	
Tel	+33 (1) 43 94 73 28	
Fax	+33 (4) 67 61 44 15	
	Postal address CIRAD (Tera) - CIRED (Umr) TA 4015, 73 rue J.F. Breton 34398 Montpellier Cedex France	

At the bottom, there is a 'DATE (registration / update)' field with the value '04/07/2005'.

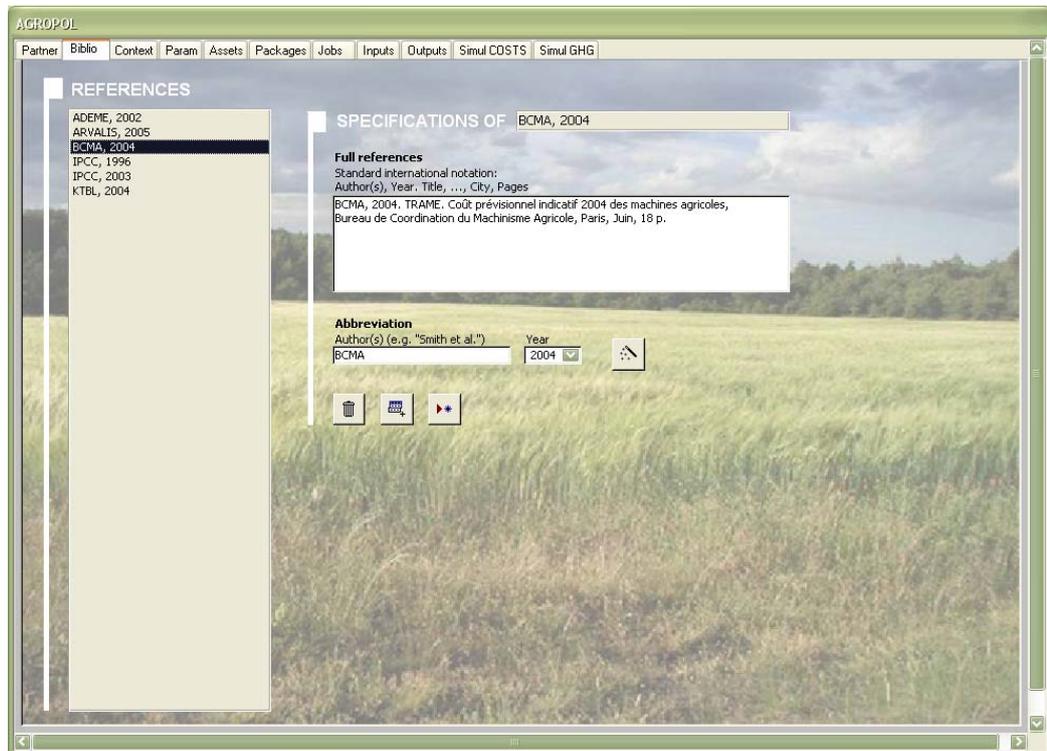
- A** This **Name of partner** (locked cell) is automatically structured with last and first names of screen 01B. It shows how the data provider will be identified on Agropol screens, printings or exported files. When a name is selected in this list of names (thanks to the arrows on the underneath), it leads firstly to show on screen 01B/C its detailed information for verification or modification purposes, secondly to restrict all following Agropol use to data pertaining to this name only. Elements of this list of names can be deleted (with restrictions), duplicated (with restrictions) and/or enlarged (see buttons/icons just on the underneath).
- B** This section must be carefully filled in for reasons explained in above introduction. Future Agropol versions might include here a space for password definition/entry.
- C** The **Date** of registration is automatically filled in, but must be manually changed when information on data provider is updated.

## Details

## Aims

A "Partner" (screen 01) may keyboard some data which come from his/her own experience, and/or interviews, and/or also from various literature (scientific articles, reports, working papers, web pages, etc.). These sources of information must be mentioned to respect individual or collective intellectual properties. The aim of this screen 02 is therefore to register these bibliographic references according to current international standards, as well as to fulfil another Agropol ambition: to progressively build and enjoy an international bibliography on data useful for studying and analysing agricultural and forestry practices.

## Visual aspect and screen sections



- A** This **List of references** (locked cells) is accessible to any user, here as well as on other screens, and everyone is invited to enlarge it. When an element is clicked with the mouse, the details of the bibliographic reference is shown on the right side (screen 02B).
- B** The **Full bibliographic reference** are keyboarded in this space, and in such a way that it includes all elements and precisions required by international scientific journals. In future Agropol versions, this section might be improved to better guide and homogenise the bibliographic presentations (separate cells for names, year, title, publisher, town, pages, etc.).
- C** The **Abbreviation** section is important since it configures how the bibliographic reference will be quoted everywhere else. The length for "Author(s)" is rather short and must follow the standard presentation of bibliographic abbreviations.

## Details

## Aims

Agricultural and forestry activities are embedded in very various ecosystems which are strong driving forces of these activities and their outputs, but also driven by these same activities and outputs. These key and complex ecosystems can be characterized by loads of information well beyond the scope of Agropol which challenge was to find a compromise between, on the one hand minimum information for some Agropol future assessments (e.g. estimate of greenhouse gas emission/sink) or for running more sophisticated tools (e.g. bio-physical models such as Epic) and, on the other hand, what a non-specialist is able to keyboard without spending hours to look for correct and precise information. This screen 03 is the tentative result of a compromise which is still open to debate (comments most welcomed).

## Visual aspect and screen sections

- A** The **Partner name** (locked cell) is automatically filled in according to the selection made on screen 01A,
- B** ...and the **list of contexts** (locked cells) already keyboarded by this partner are listed on the right side, in alphabetic order. A click on one of these element displays its details on the underneath (screen 03C/D/E/F/G), and emulates most of other following Agropol screens which are, otherwise, kept frozen (grey screens). Elements of this list can be deleted (with restrictions), duplicated (with restrictions) or enlarged (see buttons/icons on the left side).
- C** The **Context name** is keyboarded here in any language, the only restriction being that the text does not exceed 25 characters including blank spaces. This text is usually the name of a farm, or the name of a region with homogeneous agro-climatic, landscape and farm conditions. On the right side of this space is mentioned in a locked cell how the context name will appear in the list above as well as everywhere else in Agropol; this reference is valid only if the name given to the context is preceded (automatically) by the country code which is selected just below.
- D** In this section starts the keyboarding of minimum information on agro-climatic, landscape and farm conditions. The **Location** is informed by selecting first a country (combobox of 226 options ordered by the 2-letter country UN code) and then by typing in a "Memo" on the right side more precise information on the location. These Memos (without limits of length) are available for every following comboboxes (or group of comboboxes), here as well as in most other Agropol screens, to encourage the keyboarding (if possible in English or French languages) of any information not currently captured by Agropol, and potentially crucial for understanding a situation, or analysing later on some dimensions within or beyond Agropol scopes.
- After the location of the Context, following comboboxes and memos are successively on:
- the **Climate**, with 9 options (IPCC, 2003) (see combobox below);
  - the **Slope**, with 3 options (see combobox below);
  - the **Altitude**, with 4 options (FADN) (see combobox below); if the exact altitude is known, it can be keyboarded (in meters only) to replace the default value used for each option.

## Details

Location ▼		
CI	Côte d'Ivoire	Côte d'Ivoire
HR	Croatia	Croatie
CU	Cuba	Cuba
CY	Cyprus	Chypre
CZ	Czech Republic	Tchèque, République
DK	Denmark	Danemark
DJ	Djibouti	Djibouti
DM	Dominica	Dominique
DO	Dominican Republic	Dominicaine, République
EC	Ecuador	Équateur
EG	Egypt	Égypte
SV	El Salvador	El Salvador
GQ	Equatorial Guinea	Guinée équatoriale
ER	Eritrea	Érythrée
EE	Estonia	Estonie
ET	Ethiopia	Éthiopie
FO	Faeroe Islands	Féroé, Iles
FK	Falkland Is (Malvinas)	Falkland (Malvinas), Ile
FJ	Fiji Islands	Fidji, Iles
FI	Finland	Finlande
<b>FR</b>	<b>France</b>	<b>France</b>
GF	French Guiana	Guyane française
PF	French Polynesia	Polynésie française
GA	Gabon	Gabon
GM	Gambia	Gambie
GE	Georgia	Géorgie
DE	Germany	Allemagne
GH	Ghana	Ghana
GI	Gibraltar	Gibraltar
GR	Greece	Grèce

Climate ▼			
CTD	Cold temperate, dry	< 10°C	PET > Annual Precip
CTM	Cold temperate, moist	< 10°C	PET <= Annual Precip
WTD	Warm temperate, dry	10°C to 20°C	< 600 mm
<b>WTM</b>	<b>Warm temperate, moist</b>	<b>10°C to 20°C</b>	<b>PET &lt;= Annual Precip</b>
TRD	Tropical, dry	> 20°C	< 1000 mm
TRM	Tropical, moist	> 20°C	1000 to 2000 mm
TRW	Tropical, wet	> 20°C	> 2000 mm
PBD	Polar/Boreal, Dry	< 0°C	PET > Annual Precip
PBW	Polar/Boreal, Wet	< 0°C	PET <= Annual Precip
---	---	---	---

Slope ▼		
<b>1</b>	<b>Flat</b>	<b>Plat</b>
2	Hilly	Collineux
3	Mountainous	Montagneux
	Unknown	Inconnu

Altitude ▼		
<b>150</b>	<b>&lt; 300 m</b>	<b>&lt; 300 m</b>
450	300-600 m	300-600 m
850	600-1100 m	600-1100 m
1200	>1100 m	>1100 m
	Unknown	Inconnu

**E**

For the soil, Agropol needs absolutely (bold letters) that be selected one of the six options of **Soil (1)** (see combobox below) in order to assess, later on, the soil carbon content (IPCC, 2003). But more precise information on the soil are more than welcomed, especially the following pieces which are in fact the minimum required for running biophysical models such as Epic:

- **Soils (2)** which lists names of soils according to WRB or USDA classification: 34 options in total, pre-filtered here by the "Soil (1)" option (see combobox below);
- **Texture**, with 6 options (see combobox below);
- **Stoniness**, with 3 options (see combobox below); if the exact percentage of stones is known, it can be keyboarded to replace the default value used for each option;
- **Depth** (to rock or impermeable layer), with 4 options (see combobox below); if the exact soil depth is known, it can be keyboarded (in centimetres only) to replace the default value used for each option.

Soil (1) ▼		
---	---	---
AQUI	Aquic	Ique
HCAM	High clay activity mineral	Minéraux argileux à forte activité
LCAM	Low clay activity mineral	Minéraux argileux à faible activité
SAND	Sandy	Sableux
SPOD	Spodic	Spodique
VOLC	Volcanic	Volcanique

Soil (2) ▼		
ALBE	Albeluvisol	WRB
ALIS	Alisol	WRB
CALC	Calcisol	WRB
CAMB	Cambisol	WRB
CHER	Chernozem	WRB
GYPG	Gypsisol	WRB
KAST	Kastanozem	WRB
LEPT	Leptosol	WRB
LUVI	Luvisol	WRB
PHAE	Phaeozem	WRB
REGO	Regosol	WRB
SOLO	Solonet	WRB
UMBR	Umbrisol	WRB
VERT	Vertisol	WRB
ARID	Aridisol	USDA
ALFI	Alfisol (high-base status)	USDA
INCE	Inceptisol	USDA
MOLL	Mollisol	USDA
VERT	Vertisol	USDA

Texture ▼		
1	Coarse (clay <18% + sand >65%)	Grossier (argile <18% + sable >65%)
2	Medium (18% <clay <35% + sand >15% OR clay <18% + 15% <sand < 65%)	Moyen (18% <argile <35% + sable >15% OU argile <18% + 15% <sable < 65%)
3	Medium fine (clay <35% + sand <15%)	Moyen fin (argile <35% + sable <15%)
4	Fine (35% <clay <60%)	Fin (35% <argile <60%)
5	Very fine (clay >60%)	Très fin (argile >60%)
6	Other	Autre
	Unknown	Inconnu

Stones ▼		
5	Low (stones < 10%)	Bas (pierres < 10%)
15	Medium (10-20% of stones)	Moyen (10-20% de pierres)
20	High (stones >20%)	Elevé (pierres > 20%)
	Unknown	Inconnu

Depth ▼		
20	Shallow (< 40 cm)	Peu profond (< 40 cm)
60	Moderate (40-80 cm)	Modéré (40-80 cm)
100	Deep (80-120 cm)	Profond (80-120 cm)
140	Very deep (> 120 cm)	Très profond (> 120 cm)
	Unknown	Inconnu

**F** The **Human density**, or anthropization of the context (see combobox below, with 4 options), is also of key importance for analysing an agricultural activity and its outputs (availability of roads, electricity, labour, credit, inputs, markets, etc.), beside **Farm size**, which varies enormously from a world region to another: a farmer cultivating 20 hectares is usually considered as a big/rich farmer in India while it is a small/poor one in Brazil. For forestry, this Farm size is the size of the plantation, while for agriculture, it is the area not occupied by forests and unproductive lands (roads, constructions, canals, etc.). The **unit of area** chosen in the last combobox (5 options, see supra "General remarks") is important since all other Agropol screens will use this unit as the default unit of area for the context.

Human density ▼		
1	'Natural' space	Espace 'naturel'
2	Low density	Densité faible
3	Medium density	Densité moyenne
4	High density, Peri-urban	Densité élevée, Péri-urbain

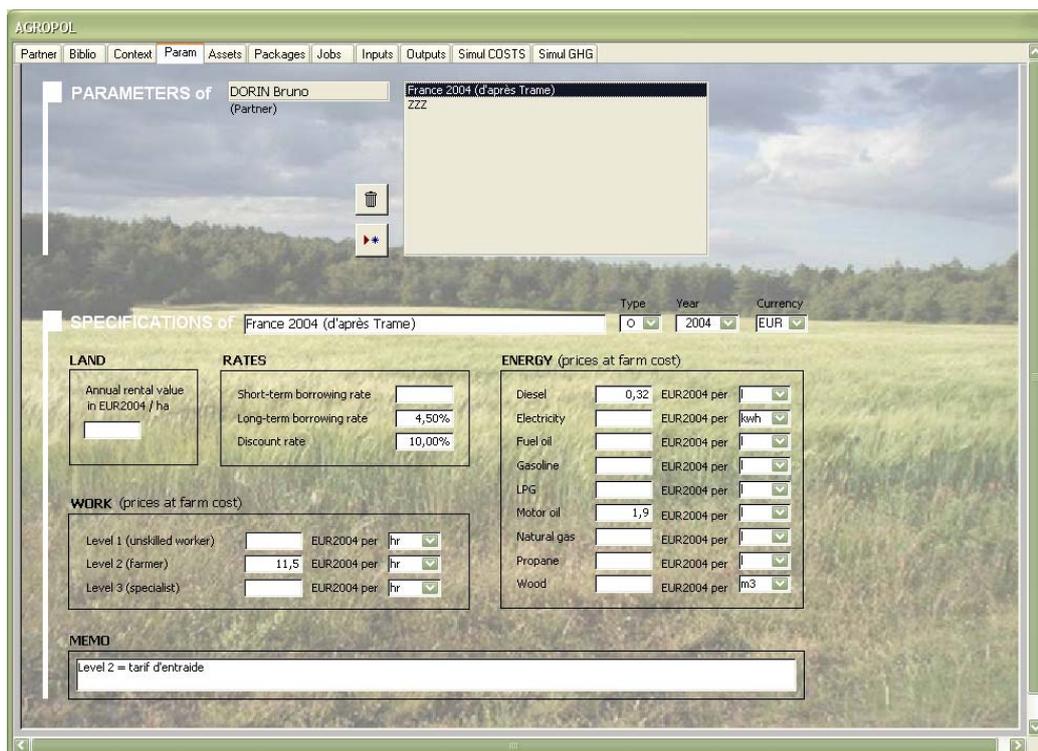
**G** In this table for **Biblio references** must be mentioned all reference materials which have been used (screen 03) or which will be used (following Agropol screens) for keyboarding some data or any other piece of information connected to the context. The options available by clicking in a cell of the table and the arrow on the right side (see below) are the ones listed in screen 02A. In case of mistake, a bibliographic reference can be eliminated from the table by selecting the entire line (click on the square with an arrow just before the reference) and using the "Delete" key of the keyboard.

	ARVALIS, 2005
▶	ARVALIS, 2005
	ADEME, 2002
	IPCC, 1996
	BCMA, 2004
	IPCC, 2003
	KTBL, 2004

Aims

Profitability of agricultural and forestry activities is relative for numerous reasons, among which are the following ones: (1) within a country, costs and margins vary from a year to another due to fluctuant prices of inputs and outputs; (2) between countries or continents, opportunity costs of factors (land, capital, labour...) are different due to complex historical processes (population growth and level of welfare, government's or multinationals' policies, taxes or subsidies for social or environmental concerns, etc.); (3) methods for calculating costs and margins vary also from a place to another, and differences observed may sometimes just be explained by a difference of terminology and/or computation. In order to bypass as far as possible these limits for comparing costs and margins of agro-technologies beyond the time and space conditions of their economical measurement, this screen 04 captures some parameters which will be used later on to compute either "real" costs (i.e. costs with some known local annual prices/rates) or "virtual" costs (i.e. costs for comparisons or scenarios purposes). In other words, the Agropol Partner has here the opportunity to keyboard not only a set of "observed" parameters, but also other sets of parameters in order to test, for example, how a price increase in labour or in fuels will impact the total cost of a technical package.

Visual aspect and screen sections



- A The **Partner name** (locked cell) is automatically filled in according to the selection made on screen 01A,
- B ...and the **sets of parameters** (locked cells) already keyboarded by this partner are listed on the right side, in alphabetic order. A click on one of these set displays its details on the underneath (screen 04C/D), and emulates also the hyperlink "Param" of screen 05B. Elements of this list can be deleted (with restrictions) or enlarged (see buttons/icons on the left side).
- C The **Name of a set of parameters** is keyboarded here in any language, the only restriction being that the text does not exceed 50 characters including blank spaces. This text starts usually with a name of a country, followed by a year (past or coming) and any other useful information which will help the Partner to select later on the set of parameters he/she wants without coming back to this screen 04. On the right side of this text space are the 3 following comboboxes:
  - **Type**, with 2 options (see combobox below);
  - **Year** (from 1900 to 2050) and **Currency** (see supra combobox in "General remarks") which are automatically pasted (e.g. "EURO2004") for being mentioned in many legends on the underneath (screen 04D)

Type ▾		
O	observed values for the year mentioned	valeurs observées à l'année indiquée
T	test values (scenario, prospective, etc.)	valeurs test (scénario, prospective, etc.)

Details

**D**

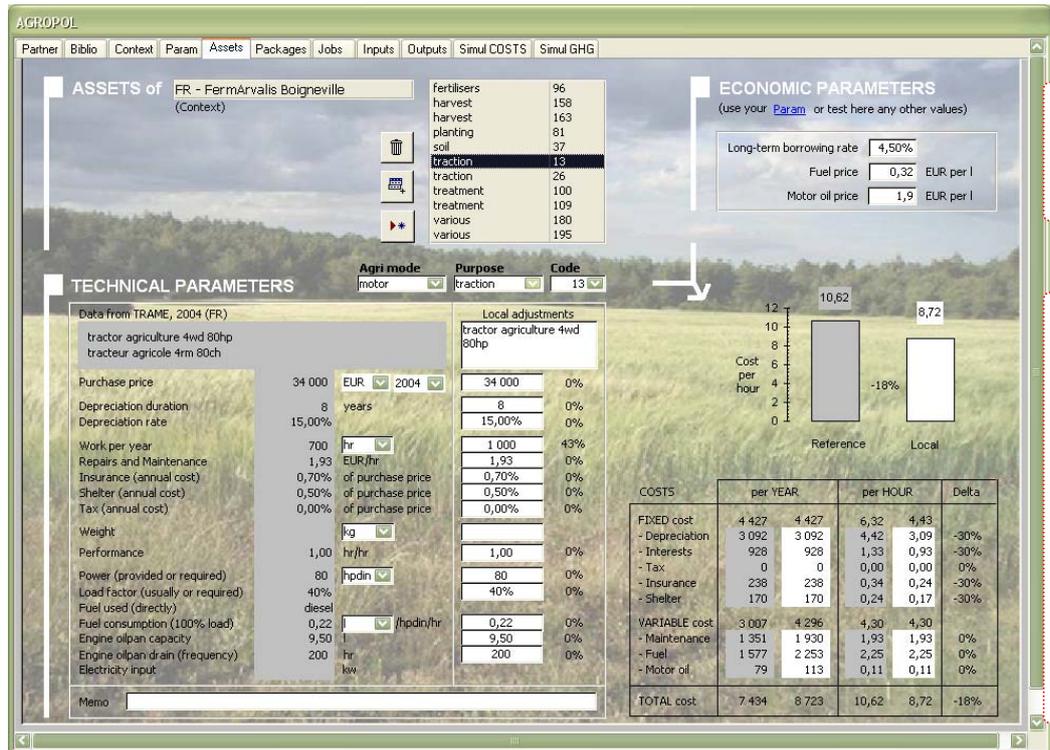
In this section are keyboarded (or displayed) some parameters gathered into 4 subsections:

- **Land**, with 1 cell: the annual rental value per unit of area selected in screen 03F;
  - **Rates**, with 3 cells: Short-term borrowing rate (i.e. for loans not exceeding one year), Long-term borrowing rate (i.e. for loans above 1 year), and Discount rate (for activities running over several years).
  - **Work**, with 3 levels of price at farm costs, successively for unskilled workers, farmers and specialists;
  - **Energy**, with 9 options in the current version; the presentation of this subsection will change in future Agropol versions: the list of options will be increased but not all displayed (an extendable table with comboboxes will enable to select and display only fuels used), as well as extend to technical parameters (greenhouse gas emissions per unit) currently displayed for possible adjustments on screens 08G and 08H.
-

Aims

Agricultural and forestry activities use various tools and means of traction/pulsion which are more or less capital intensive, more or less efficient for boosting land and human-work productivities, and more or less intensive in energy requirement (from feed for draught animals to fuel for four-wheel tractors or combine harvesters). Because these "assets" impact both costs and productivities, they are key factors for which this screen 05 is entirely dedicated. Its aim is to list and describe assets which are available in a "context" (screen 03) and which will be used later on for describing some "Jobs" (screen 07) and, then, for computing their costs (screen 10) as well as their greenhouse gas emissions (screen 11 under construction). Compared with other engineering models concerned about these aspects, Agropol's original feature is to offer a pre-recorded list of assets in order to save time, especially for those who have no or little technical knowledge on agricultural implements. This list is of course unfinished, and will be improved in future Agropol's versions, especially for developing countries, as well as for special assets (cars, trucks, water pump...) for which data are not yet available (database most welcomed).

Visual aspect and screen sections



- A** The **context name** (cell automatically filled in) is the one selected in screen 03B. If no context is selected in screen 03B, the entire screen 05 is not emulated (grey screen).  
The **list of assets** (list automatically filled in, on the right side of the context name) indicates all the assets already reported for the context, thought the mention of their purpose (asset for fertilizer application, or for harvest, or for traction...: see infra) and of their code (96, 158, 163...: see infra). Members of this list can be deleted, duplicated or increased (with buttons/icons on the left side). Selection of one of them leads also to show its details on screen 05B/C.
- B** Only one option for **Agri mode** (1<sup>st</sup> combobox) is at present available: "motor" for [motorized agriculture – *agriculture motorisée*]. But future Agropol versions concerned about developing countries will include [agriculture with draught animal – *agriculture avec traction animale*] and [manual agriculture – *agriculture manuelle*] in order to pre-select a list of assets specific to these types of agricultural production.  
The aim of **Purpose** (2<sup>nd</sup> combobox, with 8 possible options: see below) is to filter as far as possible the **Code** options (3<sup>rd</sup> combobox: see below): 220 in the current version of Agropol (BCMA, 2004).

Details

Purpose ▼	
fertilisers	engrais chimique
harvest	récolte
manure	fumure organique
planting	plantation
soil	sol
traction	traction
treatment	traitement
various	divers

Code ▼		
1	track-layer 60hp	chenillard 60ch
2	tractor step over 70hp	enjambeur 70ch
3	tractor agriculture 2wd 40hp	tracteur agricole 2rm 40ch
4	tractor agriculture 2wd 50hp	tracteur agricole 2rm 50ch
5	tractor agriculture 2wd 60hp	tracteur agricole 2rm 60ch
6	tractor agriculture 2wd 70hp	tracteur agricole 2rm 70ch
7	tractor agriculture 2wd 80hp	tracteur agricole 2rm 80ch
8	tractor agriculture 2wd 90hp	tracteur agricole 2rm 90ch
9	tractor agriculture 2wd 100hp	tracteur agricole 2rm 100ch
10	tractor agriculture 4wd 50hp	tracteur agricole 4rm 50ch
11	tractor agriculture 4wd 60hp	tracteur agricole 4rm 60 cv
12	tractor agriculture 4wd 70hp	tracteur agricole 4rm 70ch
13	tractor agriculture 4wd 80hp	tracteur agricole 4rm 80ch
14	tractor agriculture 4wd 90hp	tracteur agricole 4rm 90 cv

- C** When a code of asset is chosen (see above), details of the asset (according to a source of data mentioned on the first line) are immediately listed on a grey tinted area (locked cells), as well as copied on the right side (white colour area, modifiable cells) for local adjustments (price, depreciation duration, etc.): if changes occurred, difference between original values and local values are mentioned in percentage in order to quickly identify where such changes took place (in the above example, we have only changed one value, the “work per year”, from 700 hours to 1000 hours, i.e. an increase of 43%).
- This screen 05C is rather sophisticated for several reasons, among which are the following ones:
- (1) an asset can be “self-propelled”, or not: in this later case, the 5<sup>th</sup> last lines (from “Fuel used” to “Electricity input”) are not visible (note: “electricity input” is not yet operational in the current version);
  - (2) values for asset performance are stated in various kinds of unit (unit of time as in the above example, or unit of area, or unit of outputs such as bales of straw...) which has complicated many calculations;
  - (3) all values in this screen can be converted into other units than the original ones (from “hectare” to “acre” for example), including currency units (27 possible options in the current version) and their year (1948 to 2005 in the current version), which has also led to complicate some computations.
- D** Before showing the per hour costs of each asset (screen 05E), some economic parameters must be filled in, either by pasting the parameters selected on screen 04B thanks to a simple click on the hyperlink **Param**, or by typing any other values: nothing here (screen 05D) will be recorded and used for later computations. Only a special attention must be paid on the units of quantity/volume which must be the same between screens 05D and screen 04B.
- E** When technical and economic parameters are well-informed, the per-hour **cost** with original values (grey colour area, locked cells) and with local adjustments (white colour area, locked cells) are summarised in a bar chart, and detailed in a table on the underneath, along with annual costs. The column **Delta** shows the percentage difference between original and local per-hour costs.

Aims

Agropol is entirely dedicated to the description and analyse of agricultural/forestry production techniques which mobilize various factors (land, capital, labour, inputs...) for a wide range of outputs (food, feed, bio-energy, social and environmental externalities...). These techniques can be considered and delimited as sequences of human, animal and/or mechanical "Jobs" (see next screen 07), sequences called "Packages" in Agropol. The aim of this screen 06 is simply to characterize the "Packages" which will be detailed in the 3 following Agropol screens ("Jobs", "Inputs" and "Outputs"). In other words, compared to other engineering models, Agropol's big original feature is to ask first what will be the sequence of technologies described, and not what will be the main output produced. This approach add lot of flexibility for describing and/or analysing a variety of agro-systems, especially the complex ones (mixed crops, agro-forestry, etc.) which are not today ranked among modern production systems despite numerous advantages that Agropol may also help to better identify and quantify.

Visual aspect and screen sections

A

B

Package (Type and Name)	Duration (months)	Biomass before	Currency		Subsidy per ha	Memo
			Name	Year		
[CR] Blé tendre hiver 05	12	cere	EUR	2005	332	Conduite raisonnée
[CR] Blé tendre hiver 04	12	cere	EUR	2004	332	Conduite Ushuaia
[CR] Mais fourrage 04	10	cere	EUR	2004	317	
[CR] Protéagineux 04	11	cere	EUR	2004	120	
* [CR]			EUR	2000	0	

Detail

A The **context name** (locked cell automatically filled in) is the one selected in screen 03B. If no context is selected in screen 03B, the entire screen 06 is not emulated (grey screen). As soon as a Context is selected, the packages already reported for that Context are listed in the table on the underneath (screen 06B).

- B** In this extendable table where each lines can be deleted (with restrictions) after keyboarding (see button/icon on the right side), each package is characterized thought, successively:
- its **Type** (see combobox below): single crop, mixed crops, rotation of crops, etc.
  - its **Name**, which can be in any language, the only restriction being that the text does not exceed 25 characters including blank spaces; this text may mention the species, the season, the year(s) or any other useful information which will help the Partner to easily identify later on the package he/she wants to select without coming back to this screen 06;
  - its **Duration**, which can range from several months to several decades in the case of plantations;
  - its **Biomass before**, with 9 options (see combobox below): an important information especially for bio-physical models, or for future Agropol versions which will assess the increase or decrease of soil carbon after a land-use change (IPCC, 2003);
  - the **Currency name** and the **Currency year** which will be used to give a monetary value to costs and sales;
  - the (annual) **Subsidy per unit of area** (screen 03F), if any.

Type of package ▼

CR	single crop	culture unique
MI	mixed crops	cultures associées
RO	rotation of crops	rotation de cultures
PA	pasture	pâture
AF	agroforestry	agroforestrie
PL	plantations	plantations

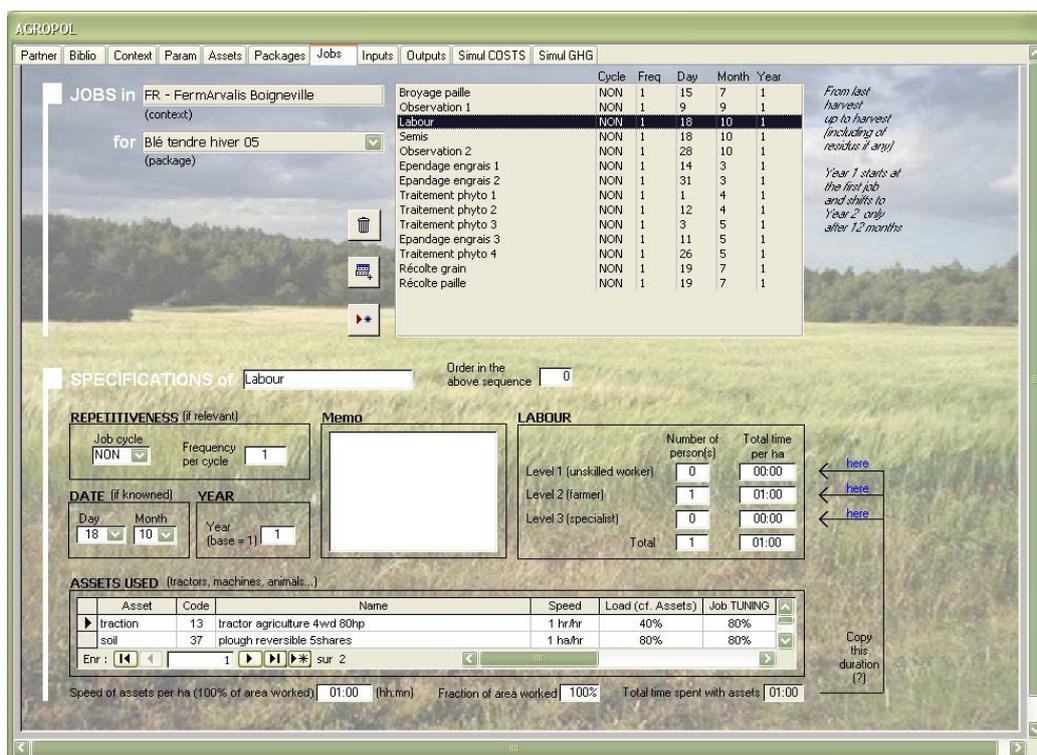
Biomass before ▼

cere	annual cereal	céréale annuelle
gram	annual gramineae (cereal excl.)	graminée annuelle (céréale excl.)
olea	annual oleaginous crop (leguminous excl.)	oléagineux annuel (légumineuse excl.)
legu	annual leguminous crop	légumineuse annuelle
annu	annual crop (other : cotton, beet, vegetable, spice...)	culture annuelle (autre : coton, betterave, légume, épice...)
herb	grassland	prairie
sava	fallow, savanna	jachère, savane
pere	perennial crop (forestry excl.)	culture pérenne (sylviculture excl.)
fore	forest, energy plantation	forêt, plantation énergétique
xxxx	(other)	(autre)
yyyy	(unknown)	(inconnu)

Aims

In Agropol, a “Package” is defined as a sequence of human, animal and/or mechanical “Jobs” (see supra, screen 06) which minimum duration starts from the harvest of the last crop/plantation, and ends when is harvested all biomasses taken out of the land (i.e. including residues if the latter are not left on the spot for various purposes: animal grazing, soil protection or regeneration, etc.). Farm post-harvest jobs, like the drying of grains, can be added if any. Whereas all these jobs and their duration are keyboarded in this screen 07, the inputs applied during these jobs, as well as the outputs obtained from these jobs, are successively keyboarded on screen 08 and on screen 09.

Visual aspect and screen sections



- A** The **Context name** (locked cell automatically filled in) is the one selected in screen 03B. If no context is selected in screen 03B, this entire screen 07 is not emulated (grey screen). When a Context is displayed, the Agropol user must choose, in the combobox on the underneath, one of the **Package** he/she has already declared in screen 06,
- B** ...and the **list of jobs** (list automatically filled in, on the right side of the package name) immediately indicates, if any, all the jobs already reported, thought the mention of their name, their cycle, their frequency and their date (day, month and year). Members of this list can be deleted (with restrictions), duplicated (with restrictions) or increased (see buttons/icons on the left side). A click of one of these jobs leads to show its details on screen 07C/D/E/F.
- C** The **Name of the job** is keyboarded here in any language, the only restriction being that the text does not exceed 25 characters including blank spaces. Usually, jobs are keyboarded in their order of appearance, but in case one of them is forgotten during the process, its correct **Order in the above sequence** (screen 07B) must be adjust by mentioning, for each job, in the cell on the right side of the Job name, its number in the sequence of jobs.
- D** The description of a job stats with its **Repetitiveness**, i.e. its **Cycle** (see combobox below, with 5 options: daily, weekly, etc.) and the **Frequency** in the cycle (e.g. “2” for “twice a day” if “DAY” has been selected before). This information must in fact only be keyboarded, if required, for packages lasting more than 1 year, or for breeding activities, which are not yet possible to describe and analyse in the current Agropol version. In other words, for an annual crop, Cycle and Frequency must be left on their default value, respectively “NON” and “1”.

Job cycle ▼		
NON	none (occasional)	aucun (occasionnel)
DAY	daily	journalier
WEE	weekly	hebdomadaire
MON	monthly	mensuel
ANN	every year [only for package duration > 24 months]	chaque année (uniquement pour durée de paquet > 24 mois)

The **Day** (combobox of 31 options, from 1 to 31) and the **Month** (combobox of 12 options, from January to December) of the job must then be mentioned as far as possible (information especially useful for bio-physical model), along with the **Year** number: for an annual crop, it must always be 1 (the default value). In next Agropol versions, this year number will be used to discount accordingly all cost values associated to the concerned job.

**E** In the section for **Labour**, the **Number of persons** involved in each job, as well as the **Total time** spent for each job (in hr:mn) per unit of area (screen 03F), must be keyboarded for each levels of remuneration: unskilled worker, farmer and specialist (screen 04D). After the keyboarding, the total of each column (number and time) is automatically done by Agropol (locked cells) for checking purposes.

**F** In this last section (extendable table), **Assets used** during the job are selected one by one by a click in the cell of the column "Asset" which displays a combobox (see below) listing all assets available in the Context (screen 05). When one of these assets is selected, its **Code** is automatically filled in (locked cell), as well as its **Name** (default name or name given by the Partner if any) (locked cell), its **Speed** (locked cell), and the **Load** factor which is mentioned twice, first in a locked cell, and then in a modifiable cell for **Job Tuning** if it is of course required, but as it is the case in our example: the job named "Labour" ("Tillage" in English) use a plough which required a load of 80%, whereas the default load factor of the tractor is 40%: the latter percentage must be changed into 80% so that Agropol will be able to compute a double consumption of fuel for this specific work (tillage).

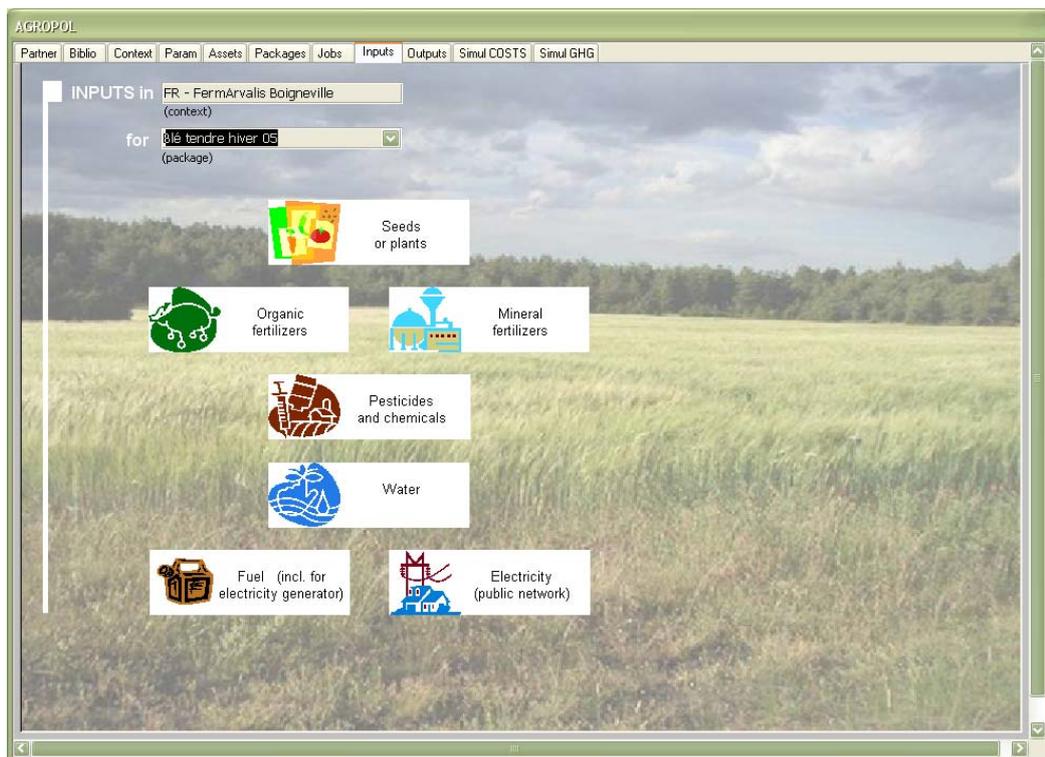
	Asset	Code	Name	Speed	Load (cf. Assets)	Job TUNING
	traction	13	tractor agriculture 4wd 80hp	1 hr/hr	40%	80%
	fertilisers	96	fertiliser applicator centrifugal 8hl <30m		80%	80%
Enr	harvest	163	pick-up press round bales varia room 120cm d<180			
	harvest	158	harvester cereals 5shakers cut 4-5m 185hp			
	planting	81	sower cereals 4m			
	soil	37	plough reversible 5shares			
	traction	26	tractor arboriculture 4wd 80hp			
	traction	13	tractor agriculture 4wd 80hp			
	treatment	100	sprayer selfpropeled 4wd 160hp 3000l 28m			
	treatment	109	sprayer low crop 1000l 18m			
	various	180	tub 8t 1axle			
	various	195	crusher straw vertical axis width 2m			

When all assets used for a job are keyboarded, Agropol computes whenever it is possible the **Speed of the asset** (first cell below the table) per unit of area (screen 03F). If no or incorrect value is mentioned, a new one must be keyboarded here, along with the **Fraction of area worked** (default value = 100%, but some jobs may be only on some portions of the land) so that the **Total time spent with assets** (locked cell) is correctly assessed (Speed of asset \* Fraction of area worked). With a click on the **hyperlinks "here"**, this total time can be paste/considered as the total time of a labour category (usually the farmer) if no more precise value is available.

Aims

Since the dawn of time, beside selected seeds or plants, farmers have applied inputs for maintaining and rising the land productivity (water, manure, etc.). Nowadays, these inputs may be used in massive quantities, and may also be produced by multinational industries like for pesticides and chemical fertilizers. The applications of “traditional” or “modern” inputs are fundamental components of a technical “Package” (screen 06), not only because they may be the only purpose of some human, animal and/or mechanical “Job” (screen 07), but also because they impact the yields, the costs as well as the ecosystem. The aim of this screen 08 is to keyboard the various inputs applied in a Package, through the mention of their type and cost, and as far as possible of their quantity, since these quantities are necessary for future Agropol version (assessment of greenhouse gases emissions and of some other environmental indicators), as well as for some other kinds of tools (biophysical models). Because all these data can hardly be keyboarded on a single screen, categories of inputs have been here mentioned in a rectangle along with an appropriate icon, rectangles on which a click with the mouse leads to open a specific window.

Visual aspect and screen sections



**A** The **Context name** (locked cell automatically filled in) is the one selected in screen 03B. If no context is selected in screen 03B, this entire screen 08 is not emulated (grey screen). When a Context is displayed, the Agropol user must then choose, in the combobox on the underneath, one of the **Package** he/she has already declared on screen 06.

**B** A click on the rectangle entitled “**Seeds or plants**” opens the window below:

Details



The **Type of Seed/Plant** is selected through 3 comboboxes (see below), listing successively:

- 3 possible origin (beside "other", "unknown" and "special"),

- 9 groups of species,

- 165 common world species (with their English, French and Latin names) which choice is filtered through the option selected in the previous combobox (group of species).

CONV		
FARM	farm seed/plant	semence/plant d'origine fermière
CONV	seed/plant certified by a public/private institution	semence/plant certifié par organisme public/privé
GEMO	GMO seed/plant	semence/plant OGM
xxxx	(other)	(autre)
yyyy	(unknown)	(inconnu)
zzzz	(special)	(spécial)

cere		
cere	annual cereal	céréale annuelle
gram	annual gramineae (cereal excl.)	graminée annuelle (céréale excl.)
olea	annual oleaginous crop (leguminous excl.)	oléagineux annuel (légumineuse excl.)
legu	annual leguminous crop	légumineuse annuelle
annu	annual crop (other : cotton, beet, vegetable, spice...)	culture annuelle (autre : coton, betterave, légume, épice...)
herb	grassland	prairie
sava	fallow, savanna	jachère, savane
pere	perennial crop (forestry excl.)	culture pérenne (sylviculture excl.)
fore	forest, energy plantation	forêt, plantation énergétique
xxxx	(other)	(autre)
yyyy	(unknown)	(inconnu)

wheat			
(other cereal)	(autre céréale)	?	?
barley	orge	Poaceae	Hordeum
buckwheat	sarrasin	Polygonaceae	Fagopyrum
canary seed	alpiste	Poaceae	Avena
fonio	fonio	Poaceae	Digitaria
maize	maïs	Poaceae	Zea
millet	millet	Poaceae	Echinocloa, Eleusine, Eragrostis, P.
oats	avoine	Poaceae	Avena
quinoa	quinoa	Chenopodiaceae	Chenopodium
rice, paddy	riz, paddy	Poaceae	Oryza
rye	seigle	Poaceae	Secale
sorghum	sorgho	Poaceae	Sorghum
triticale	triticale	Poaceae	Triticosecale
wheat	blé	Poaceae	Triticum

Then the **Dose** (per unit of area: screen 03F) and the **Costs** (per unit of currency: screen 06B) have to be keyboarded. The cost per unit of area must have a value like in all other windows for inputs, whereas here, the Dose and/or the unit Cost are not mandatory even if these values are strongly expected. Between these 3 cells (Dose + Unit cost + Cost per unit of area), when 2 of them are filled in, Agropol computes and displays the remaining one.

Before a Memo dedicated to any other useful information, the **Date** of sowing/planting (year, month and day) is automatically filled in after a click on the arrow and the selection, within the combobox which is displayed (see below), of the corresponding job. If no date is mentioned in the combobox, whereas this date is known (at least the year and the month), the latter must absolutely be keyboarded in screen 07D, and not here.

Date	
Year 1, Month 7, Day 15	Broyage paille
Year 1, Month 9, Day 9	Observation 1
Year 1, Month 10, Day 18	Labour
Year 1, Month 10, Day 18	Semis
Year 1, Month 10, Day 28	Observation 2
Year 1, Month 3, Day 14	Ependage engrais 1
Year 1, Month 3, Day 31	Ependage engrais 2
Year 1, Month 4, Day 1	Traitement phyto 1
Year 1, Month 4, Day 12	Traitement phyto 2
Year 1, Month 5, Day 3	Traitement phyto 3
Year 1, Month 5, Day 11	Ependage engrais 3
Year 1, Month 5, Day 26	Traitement phyto 4
Year 1, Month 7, Day 19	Récolte grain
Year 1, Month 7, Day 19	Récolte paille

If other materials are sown or planted, they can similarly be keyboarded in the next lines of the (extendable) table, and the **Total cost** per unit of area is gradually computed at the bottom of the window (locked cell). This total must be checked since it will be used and/or displayed as it is in other Agropol processes. And in case this total cost can unfortunately not be detailed by Jobs, there is a special procedure for bypassing this problem (see instructions on the screen itself and the example displayed infra in the pesticide window).

C

A click on the rectangle entitled “Organic fertilizers” opens the window below:

The **Type of Manure** is selected through 2 comboboxes (see below), listing successively:

- 3 possible origin (beside “other”, “unknown” and “special”),
- 14 organic fertilizers (beside “other” and “unknown”) which choice is filtered through the option selected in the previous combobox (origin).

FARM	Animal faeces	Déjections animales
URBA	Urban/Domestic waste	Déchets urbains/domestiques
INDU	Material of industrial origin	Matière d'origine industrielle
xxxx	(other)	(autre)
yyyy	(unknown)	(inconnu)
zzzz	(special)	(spécial)

FARM	0	
1	manure of cattle - stall housing	fumier bovin - stabulation entravée
2	manure of cattle - open housing	fumier bovin - stabulation libre
3	manure of horse	fumier équin
4	manure of sheep	fumier ovin
5	manure of goat	fumier caprin
6	manure of swine	fumier porcin
7	manure of poultry	fumier avicole
8	liquid manure - dilution by rainwater	lisier - dilution par eaux de pluie sur aire
9	liquid manure - dilution by water from milking room	lisier - dilution par eaux de salle de traite
10	(other)	(autre)
11	(unknown)	(inconnu)

If one of the 14 organic fertilizers is selected, its **Formula** is immediately displayed on the right side for checking, or for corrections when the formula is more precisely known.

Then the **Dose** (per unit of area: screen 03F) and the **Costs** (per unit of currency: screen 06B) have to be keyboarded. The cost per unit of area must have a value like in all other windows for inputs, as also here the Dose and/or the unit Cost. Between these 3 cells (Dose + Unit cost + Cost per unit of area), when 2 of them are filled in, Agropol computes and displays the remaining one.

Above a Memo dedicated to any other useful information, the **Date** of the fertilizer application (year, month and day) is automatically filled in after a click on the arrow and the selection, within the combobox which is displayed (see combobox “Date” for Seeds/Plants), of the corresponding job. If no date is mentioned in the combobox, whereas this date is known (at least the year and the month), the latter must absolutely be keyboarded in screen 07D, and not here.

If other organic fertilizers are spread, they can similarly be keyboarded in the next lines of the (extendable) table, and the **Total cost** per unit of area is gradually computed at the bottom of the window (locked cell), along with the **Total nutrients** applied. These totals must be checked since they will be used and/or displayed as they are in other Agropol processes (NB: N quantities are especially important for computing N<sub>2</sub>O emissions). And in case this total cost or total nutrients can unfortunately not be detailed by Jobs, there is a special procedure for bypassing this problem (see instructions on the screen itself and the example displayed infra in the pesticide window).

D

A click on the rectangle entitled “Mineral fertilizers” opens the window below:

The **Type of Fertilizer** is selected through 2 comboboxes (see below), listing successively:

- 7 groups of mineral fertilizers (beside “other”, “unknown” and “special”),
- 36 mineral fertilizers (beside “other” and “unknown”) which choice is filtered through the option selected in the previous combobox (group).

N--	nitrogen fertilizer	engrais azoté
-P-	phosphorus fertilizer	engrais phosphorique
--K	potassium fertilizer	engrais potassique
NP-	NP fertilizer	engrais NP
N-K	NK fertilizer	engrais NK
-PK	KP fertilizer	engrais KP
NPK	NPK fertilizer	engrais NPK
xxxx	(other)	(autre)
yyyy	(unknown)	(inconnu)
zzzz	(special)	(spécial)

N--	1	ammonia, anhydrous	ammoniaque anhydre	82 N
	2	ammonia, aqua	ammoniaque aqueuse	16-25 N
	3	ammonium bicarbonate	ammonium, bicarbonate d'	15-17 N
	4	ammonium chloride	ammonium, chlorhydrate d'	25-27 N
	5	ammonium nitrate (ammonitrate)	ammonitrate (nitrate d'ammonium)	33,5-34,5 N
	6	ammonium nitrate-limestone	ammonitrate bas et moyen dosage	20,5-28 N
	7	ammonium sulphate (sulphate of ammonia)	ammonium, sulfate d'	20,5-21 N
	8	ammonium sulphate nitrate	ammonium, sulfonitrate d'	26 N
	9	cyanamide, calcium	cyanamide calcique	20-21 N
	10	nitrate, calcium	nitrate de chaux	15-20 N
	11	nitrate of soda	nitrate de soude	
	12	nitrogen solution	solution azotée	21-49 N
	13	urea	urée	33-46 N
	14	urea, sulfur-coated	urée sulfurée	35 N
	15	(other)	(autre)	
	16	(unknown)	(inconnu)	

If one of the 36 mineral fertilizers is selected, its **Formula** is immediately displayed on the right side for checking, or for corrections when the formula is more precisely known.

Then the **Dose** (per unit of area: screen 03F) and the **Costs** (per unit of currency: screen 06B) have to be keyboarded. The cost per unit of area must have a value like in all other windows for inputs, as also here the Dose and/or the unit Cost. Between these 3 cells (Dose + Unit cost + Cost per unit of area), when 2 of them are filled in, Agropol computes and displays the remaining one.

Above a Memo dedicated to any other useful information, the **Date** of the fertilizer application (year, month and day) is automatically filled in after a click on the arrow and the selection, within the combobox which is displayed (see combobox “Date” for Seeds/Plants), of the corresponding job. If no date is mentioned in the combobox, whereas this date is known (at least the year and the month), the latter must absolutely be keyboarded in screen 07D, and not here.

If other mineral fertilizers are spread, they can similarly be keyboarded in the next lines of the (extendable) table, and the **Total cost** per unit of area is gradually computed at the bottom of the window (locked cell), along with the **Total nutrients** applied. These totals must be checked since they will be used and/or displayed as they are in other Agropol processes (NB: N quantities are especially important for computing N<sub>2</sub>O emissions). And in case this total cost or total nutrients can unfortunately not be detailed by Jobs, there is a special procedure for bypassing this problem (see instructions on the screen itself and the example displayed infra in the pesticide window).

E

A click on the rectangle entitled “Pesticides and chemicals” opens the window below:



The **Type of Pesticides** is selected through 2 comboboxes (see below), listing successively:

- 7 groups of pesticides (beside “other”, “unknown” and “special”),
- 6345 pesticides (beside “other” and “unknown”) which choice is filtered through the option selected in the previous combobox (group); if one of these 6345 pesticide is selected, available information on its **Toxicity** is immediately displayed on the right side of the window.

HER1	herbicide	herbicide
HER1	herbicide safener	protection contre herbicide
HER2	herbicide safener	protection contre herbicide
HER3	algaeicide	algicide (anti-algue)
HER4	plant growth regulator	régulateur de croissance de plante
HER5	defoliant	défoliant
HER6	desiccant	dessiccatif
INS1	insecticide	insecticide
INS2	insect growth regulator	régulateur de croissance d'insecte
INS3	repellent - insect	répulsif - insecte
INS4	pheromone	phéromone
INS5	synergist	synergiste
MIC1	fungicide	fongicide
MIC2	viruscide	viruscide (anti-virus)
MIC3	microbiocide	microbiocide
MIC4	wood preservative	conservateur de bois
GAS1	fumigant	fumigène
GAS2	propellant	propulseur
NEM1	nematicide	nématocide
AVI1	avicide	avicide (anti-oiseau)
AVI2	repellent - bird	répulsif - oiseau
MAM1	rodenticide	rodenticide (anti-rongeur)
MAM2	repellent - rodent	répulsif - rongeur
MAM3	repellent - bear	répulsif - ours
MAM4	repellent - deer	répulsif - cerf, biche
MAM5	repellent - dog and cat	répulsif - chien ou chat
MOL1	molluscicide	molluscicide (anti-mollusque)
AQU1	piscicide	piscicide (anti-poisson)
AQU2	water treatment	traitement hydrothérapique (eau)
AQU3	antifoulant	anti-pourrissement
XX01	bait	appât
XX02	france	narfium

1	1,3-dibromo-5,5-dimethylhydantoin
2	1,3-dichloro-5,5-dimethylhydantoin
3	1,3-Dichloro-5-ethyl-5-methylhydantoin
4	1-bromo-3-chloro-5,5-dimethyl hydantoin
5	1-Hydroxymethyl-5,5-dimethyl hydantoin
6	1-Octanol
7	1H-Pyrazole-3-carbonitrile, 5-amino-1-(2,6-dichloro-4-(trifluoromethyl)phenyl)-4-((trifluoromethyl)sulfinyl)-
8	2,3,6-TBA, dimethylamine salt
9	? 2,3,6-TBA, dimethylamine salt, other related

Then the **Dose** (per unit of area: screen 03F) and the **Costs** (per unit of currency: screen 06B) have to be keyboarded. The cost per unit of area must have a value like in all other windows for inputs, whereas here, the Dose and/or the unit Cost are not mandatory even if these values are welcomed.

Before a Memo dedicated to any other useful information, the **Date** of the pesticide application (year, month and day) is automatically filled in after a click on the arrow and the selection, within the combobox which is displayed (see combobox “Date” for Seeds/Plants), of the corresponding job. If no date is mentioned in the combobox, whereas this date is known (at least the year and the month), the latter must absolutely be keyboarded in screen 07D, and not here.

If other pesticides are used, they can similarly be keyboarded in the next lines of the (extendable) table, and the **Total cost** per unit of area is gradually computed at the bottom of the window (locked cell). This total must be checked since it will be used and/or displayed as it is in other Agropol processes. And in case this total cost or total nutrients can unfortunately not be detailed by Jobs, there is a special procedure for bypassing this problem (see instructions on the screen itself and the result displayed above).

F

A click on the rectangle entitled “Water” opens the window below:



The **Type of Water** is selected through 2 comboboxes (see below), listing successively:  
 - 3 kinds of water (beside “other”, “unknown” and “special”),  
 - 4 types of irrigation (beside “other” and “unknown”).

PREC	rainwater	eau de pluie
IRRI	irrigation water	eau d'irrigation
DRIN	drinking water	eau de boisson
xxxx	(other)	(autre)
yyyy	(unknown)	(inconnu)
zzzz	(special)	(spécial)

1	gravitational (embankments...)	gravitationnelle (digues...)
2	sprinkled - high pressure (cannons)	aspersion haute pression (canons)
3	sprinkled - low pressure (ramps, sprinklers)	aspersion basse pression (rampes, sprinklers)
4	drop by drop	goutte à goutte
5	(other)	(autre)
6	(unknown)	(inconnu)

Then the **Dose** (per unit of area: screen 03F) and the **Costs** (per unit of currency: screen 06B) have to be keyboarded. The cost per unit of area must have a value like in all other windows for inputs, whereas here, the Dose and/or the unit Cost are not mandatory even if these values are strongly expected. Between these 3 cells (Dose + Unit cost + Cost per unit of area), when 2 of them are filled in, Agropol computes and displays the remaining one.

Before a Memo dedicated to any other useful information, the **Date** of water use (year and month) is automatically filled in after a click on the arrow and the selection, within the combobox which is displayed (see combobox “Date” for Seeds/Plants), of the corresponding job. If no date is mentioned in the combobox, whereas this date is known (at least the year), the latter must absolutely be keyboarded in screen 07D, and not here.

If other water is used, it can similarly be keyboarded in the next lines of the (extendable) table, and the **Total cost** per unit of area is gradually computed at the bottom of the window (locked cell). This total must be checked since it will be used and/or displayed as it is in other Agropol processes. And in case this total cost can unfortunately not be detailed by Jobs, there is a special procedure for bypassing this problem (see instructions on the screen itself and the example displayed supra in the pesticide window).

G

A click on the rectangle entitled “Fuel” opens the window below, dedicated only to fuels which are not burnt by the assets (screen 05).

The **Type of Fuel** is selected through 2 comboboxes (see below), listing successively:

- 4 kinds of fuels (beside “other”, “unknown” and “special”),
- 17 fuels (beside “other” and “unknown”) which choice is filtered through the option selected in the previous combobox (kind of fuel); if one of the 17 fuels is selected, its **CO2 emission** is immediately displayed on the right side for checking, or for corrections when the emission is more precisely known; in future Agropol version, these later indications/parameters will be transferred to screen 04.

SOLI	solid fossil	solide fossile
LIQU	liquid fossil	liquide fossile
GAZE	gaseous fossil	gaz fossile
BIOE	bio-fuel	bio-combustible
xxxx	(other)	(autre)
yyyy	(unknown)	(inconnu)
zzzz	(special)	(spécial)

LIQU		
13	fuel oil, distillate (l)	fioul, distillat (l)
14	fuel oil, distillate (kwh)	fioul, distillat (kwh)
15	fuel oil, residual (l)	fioul, résiduel (l)
16	fuel oil, residual (kwh)	fioul, résiduel (kwh)
17	diesel (l)	diesel (l)
18	diesel (kwh)	diesel (kwh)
19	kerosene (l)	kérosène (l)
20	kerosene (kwh)	kérosène (kwh)
21	petrol (gasoline) (l)	essence (l)
22	petrol (gasoline) (kwh)	essence (kwh)
23	LPG (liquefied petrol gas) (l)	GPL (gaz de pétrole liquéfié) (l)
24	LPG (liquefied petrol gas) (kwh)	GPL (gaz de pétrole liquéfié) (kwh)
25	propane (l)	propane (l)
26	propane (kwh)	propane (kwh)
27	(other) (l)	(autre) (l)
28	(other) (kwh)	(autre) (kwh)
29	(unknown) (l)	(inconnu) (l)
30	(unknown) (kwh)	(inconnu) (kwh)

Then the **Dose** (per unit of area: screen 03F) and the **Costs** (per unit of currency: screen 06B) have to be keyboarded. The cost per unit of area must have a value like in all other windows for inputs, as also here the Dose and/or the unit Cost. Between these 3 cells (Dose + Unit cost + Cost per unit of area), when 2 of them are filled in, Agropol computes and displays the remaining one.

Before a Memo dedicated to any other useful information, the **Date** of the fuel burning (year and month at least) is automatically filled in after a click on the arrow and the selection, within the combobox which is displayed (see combobox “Date” for Seeds/Plants), of the corresponding job. If no date is mentioned in the combobox, whereas this date is known (at least the year and the month), the latter must absolutely be keyboarded in screen 07D, and not here.

If other fuels are burnt, they can similarly be keyboarded in the next lines of the (extendable) table, and the **Total cost** per unit of area is gradually computed at the bottom of the window (locked cell). This total must be checked since it will be used and/or displayed as it is in other Agropol processes. And in case this total cost can unfortunately not be detailed by Jobs, there is a special procedure for bypassing this problem (see instructions on the screen itself and the example displayed supra in the pesticide window).

H

A click on the rectangle entitled “Electricity” opens the window below, dedicated only to electricity which is not used by the assets (screen 05).

Electricity

TYPE of Electricity	CO2 emission	DOSE per ha	COST in EUR2005	DATE (see JOBS)	MEMO
Value	Margin	Unit			
France	0,0696 +/- 0,15	kg CO2 / kwh	/ kwh	Y= 1 M= 0 D= 0	
	0 +/- 0	kg CO2 /	/	Y= 1 M= 0 D= 0	

Use "ZZZZ" at the end, only when, for a peculiar year, could not have been detailed the cost per application

Check total

Total cost : 0,00 EUR2005 / ha

Enr : 1 sur 1 (Filtré)

The **Type of Electricity** is selected through 1 combobox only (see below) of 1974 options, i.e. the electricity production profiles of 141 regions of the world (including the whole world itself) from 1988 to 2002 (<http://www.ghgprotocol.org>). If one of these 1974 options is selected, the **CO2 emission** per kilowatt-hour is immediately displayed on the right side for checking, or for corrections when the emission is more precisely known. In future Agropol version, these later indications/parameters will be transferred to screen 04.

France

Finland	1997
Finland	1998
Finland	1999
Finland	2000
Finland	2001
Finland	2002
France	1988
France	1989
France	1990
France	1991
France	1992
France	1993
France	1994
France	1995
France	1996
France	1997
France	1998
France	1999
France	2000
France	2001
France	2002
Gabon	1988
Gabon	1989
Gabon	1990
Gabon	1991
Gabon	1992
Gabon	1993
Gabon	1994
Gabon	1995
Gabon	1996

Then the **Dose** (per unit of area: screen 03F) and the **Costs** (per unit of currency: screen 06B) have to be keyboarded. The cost per unit of area must have a value like in all other windows for inputs, as also here the Dose and/or the unit Cost. Between these 3 cells (Dose + Unit cost + Cost per unit of area), when 2 of them are filled in, Agropol computes and displays the remaining one.

Before a Memo dedicated to any other useful information, the **Date** of the electricity use (year and month at least) is automatically filled in after a click on the arrow and the selection, within the combobox which is displayed (see combobox “Date” for Seeds/Plants), of the corresponding job. If no date is mentioned in the combobox, whereas this date is known (at least the year and the month), the latter must absolutely be keyboarded in screen 07D, and not here.

If other electricity is used, it can similarly be keyboarded in the next lines of the (extendable) table, and the **Total cost** per unit of area is gradually computed at the bottom of the window (locked cell). This total must be checked since it will be used and/or displayed as it is in other Agropol processes. And in case this total cost can unfortunately not be detailed by Jobs, there is a special procedure for bypassing this problem (see instructions on the screen itself and the example displayed supra in the pesticide window).

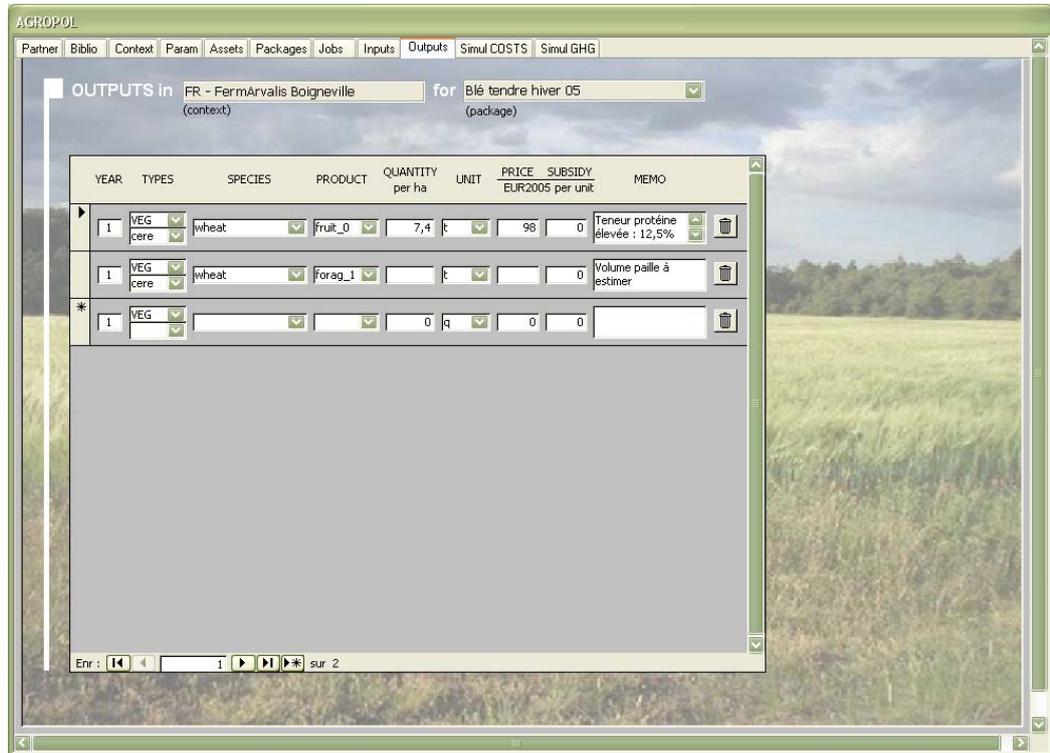
Aims

Agriculture and forestry are undoubtedly the activities which produce the most diverse physical outputs, beside their wide range of services in the fields of employment, environment, recreation, etc. The aim of this screen is to capture only the physical outputs which are obtained from the field, after a sequence of Jobs (screen 07) and an application Inputs (screen 08) pertaining to a Package (screen 06).

Visual aspect and screen sections

A

B



- A** The **Context name** (locked cell automatically filled in) is the one selected in screen 03B. If no Context is selected in screen 03B, this entire screen 09 is not emulated (grey screen). When a Context is displayed, the Agropol user must then choose, in the combobox on the right side, one of the **Package** he/she has already declared on screen 06. As soon as a Package is selected, the outputs already reported for that Package are listed in a table appearing on the underneath (screen 09B)
- B** For each **Year** of the Package (Year = 1 for annual crops) must be keyboarded in this table the different products obtained (grain of wheat and straw of wheat in our example). For each product (i.e. each line), the procedure involve the following 4 comboboxes:
  - the two first ones under the column heading **"Types"** list successively the product kingdom (only 1 option in the current Agropol version: "Vegetal") and the product group with 9 options (see below);
  - the third combobox under the column heading **"Species"** lists 165 common world species (with their English, French and Latin names: see below) which choice is filtered through the option selected in the previous combobox;
  - the fourth and last combobox, under the column heading **"Products"**, list 19 options of possible products from these species (see below).

Details

cere	▼	
cere	annual cereal	céréale annuelle
gram	annual gramineae (cereal excl.)	graminée annuelle (céréale excl.)
olea	annual oleaginous crop (leguminous excl.)	oléagineux annuel (légumineuse excl.)
legu	annual leguminous crop	légumineuse annuelle
annu	annual crop (other : cotton, beet, vegetable, spice...)	culture annuelle (autre : coton, betterave, légume, épice...)
herb	grassland	prairie
sava	fallow, savanna	jachère, savane
pere	perennial crop (forestry excl.)	culture pérenne (sylviculture excl.)
fore	forest, energy plantation	forêt, plantation énergétique
xxxx	(other)	(autre)
yyyy	(unknown)	(inconnu)

Wheat			
(other cereal)	(autre céréale)	?	?
barley	orge	Poaceae	Hordeum
buckwheat	sarrasin	Polygonaceae	Fagopyrum
canary seed	alpiste	Poaceae	Avena
fonio	fonio	Poaceae	Digitaria
maize	maïs	Poaceae	Zea
millet	millet	Poaceae	Echinochloa, Eleusine, Eragrostis, P
oats	avoine	Poaceae	Avena
quinoa	quinoa	Chenopodiaceae	Chenopodium
rice, paddy	riz, paddy	Poaceae	Oryza
rye	seigle	Poaceae	Secale
sorghum	sorgho	Poaceae	Sorghum
triticale	triticale	Poaceae	Triticosecale
wheat	blé	Poaceae	Triticum

fruit_0		
fruit_0	fruit (seed, bean, nut, berry, vegetable..)	fruit (graine, fève, noix, baie, légume...)
fruit_1	fruit with husk	fruit avec enveloppe
fruit_2	husk (bran, shell, chaff, pod...)	enveloppe (son, balle, cosse, écale, gousse)
fruit_3	stone, pip	noyau, pépin
plant_0	seed for planting	semence
plant_1	young plant for planting	plant à repiquer
forag_1	fodder (dry : straw, hay...)	fourrage sec (paille, foin...)
forag_2	fodder (silage)	fourrage ensilé
forag_3	fodder (green)	fourrage vert
forag_4	feed directly grazed by animals	aliment directement brouté par animaux
ferti_0	green manure	engrais vert
ferti_1	residue burnt on field	résidu brûlé sur le champ
branc_0	wood	bois
branc_1	stalk, stem, cane, branch, creeper	tige, canne, branche, liane
branc_2	bark	écorce
branc_3	sap, gum	sève, gomme
folia_0	leaf (only)	feuille (uniquement)
fibre_0	fibre, lint, linter	fibre, linter
rhizo_0	root, tuber, bulb	racine, tubercule, bulbe
other	(other)	(autre)

The **Quantity** obtained (per unit of area: screen 03F) is then keyboarded along with its unit **Price** (per unit of currency: screen 06B) and the **Subsidy** (per unit produced) if any.

At the end of each line stands a **Memo** for any useful information on the product (quality, destination, storage conditions, etc.).

The first two objectives of Agripol were:

- to assess the fixed and variable costs of a sequence of technical operations which leads to produce, export and sell one or several biomass fractions from a piece of land, and to deduct the profit made from the specific investments in work, capital and inputs;

- to be able to quickly recalculate these costs and profits with moving parameters across time and/or space, i.e. other prices (of labour, of fuel or electricity, of water, of outputs, etc.) and other rates (borrowing rate, discount rate, etc.) than the ones pertaining to a specific context of time and space.

The result presented in this screen 10 is satisfactory and unique compared to other engineering models. But lot of space is still left for improvements, especially for fossil fuel prices: their change not only impacts the cost of their direct uses (as presently assessed by Agropol), but also their indirect uses, in the manufacture of fertilizers for example.

COSTS		600,66	INCOMES		1117,20	
FIXED costs		193,58	32%	Sales	725,20	
Land			0%	Society incentive	392,00	
Assets	193,58	100%	<b>PROFIT</b>			
- Depreciation	137,29	71%	<b>516,54</b>			
- Interests	41,65	22%	Gross margin	834,22		
- Tax	0,00	0%	Net margin	516,54		
- Insurance	6,28	3%	0,0 hr			
- Shelter	8,36	4%	6,7 hr			
VARIABLE costs		407,08	68%	0,0 hr		
Assets	46,91	12%				
- Maintenance	26,18	6%				
- Fuel	19,88	5%				
- Motor oil	0,85	0%				
- Electricity		0%				
Labour	77,19	19%				
- Unskilled work		0%				
- Farmer work	77,19	19%				
- Specialist work		0%				
Inputs	282,98	70%				
- Seeds, plants	59,00	14%				
- Org. Fertilizers		0%				
- Min. Fertilizers	140,98	35%				
- Pesticides	83,00	20%				
- Water		0%				
- Fuel	0,00	0%				
- Electricity	0,00	0%				

**A** The **Context** (locked cell automatically filled in) is the one selected in screen 03B, and the **Param** (locked cell automatically filled in) is the set selected in screen 04B. If no Context or Param is previously selected, this entire screen 10 is not emulated (grey screen). When Context and Param are displayed, the Agropol user must select a **Package** in a combobox. After this selection, the detailed costs and incomes are displayed in a table on the underneath (screen 10B) in the **Units** displayed on the right side, i.e.:

- the unit of currency used for the Package (screen 06B): this unit of currency can be changed (11 options of currency and 57 options of years in most cases: see supra "General remarks") to display accordingly the different values mentioned in the table on the underneath;

- the unit of area chosen for the Context (screen 03F) which can also be modified (5 options) to convert the values on the underneath into another unit of area.

**B** The table (locked cells everywhere) is divided into 3 sections:

- the **Costs** section, which first displays the total cost in bold characters, and then its details, divided into **Fixed costs** and **Variables costs**. On the right side of each value is also displayed a percentage of the cost towards the immediate total or subtotal made on a line up (e.g.: in the above example, 69% of the total cost are variable costs, and about 70% of these variable costs come from inputs where the cost of mineral fertilizers account for about 35%);
- the **Incomes** section displays first a total in bold characters, and then its origins, i.e. sales and/or subsidies; a percentage on the right side of each value is also displayed to see the share of each source of revenue; future Agropol versions will display in this section the quantities obtained from the field (screen 09B), so that costs and incomes could be studied not only per unit of area as it is currently the case;
- The **Profit** section displays the Net margin (Total incomes – Total costs) and, on the underneath, the Gross margin (Total incomes – Inputs costs).

Formulas used to compute these costs, incomes and profits are detailed in the VisualBasic code printed in the Annexes.

- C A click on the icon displayed on the low-right side of the table opens another table (independent table: see below) for facilitating comparisons of costs/incomes with another set of Parameters and/or with another Package (belonging or not to the same Context).



AGROPOL		
DE - BW, NUTSII Stuttgart	(context)	UNITS :
France 2004 (d'après Trame)	(parameters)	EUR 2003
Wheat winter	(package)	per ha
<b>COSTS</b>	<b>669,89</b>	<b>INCOMES</b> <b>1074,40</b>
FIXED costs	148,20 22%	Sales 750,40 70%
Land	0%	Society incentive 324,00 30%
Assets 148,20	100%	
- Depreciation 105,08	71%	
- Interests 32,02	22%	
- Tax 0,00	0%	
- Insurance 4,46	3%	
- Shelter 6,64	4%	
<b>VARIABLE costs</b>	<b>521,69 78%</b>	<b>PROFIT</b> <b>404,51</b>
Assets 81,01	16%	Gross margin 726,50
- Maintenance 57,24	11%	Net margin 404,51
- Fuel 22,55	4%	
- Motor oil 1,23	0%	
- Electricity 0%		
Labour 92,78	18%	
- Unskilled work 0%		
- Farmer work 92,78	18%	
- Specialist work 0%		
Inputs 347,90	67%	
- Seeds, plants 72,00	14%	
- Org. fertilizers 0%		
- Min. fertilizers 137,70	26%	
- Pesticides 132,00	25%	
- Water 0%		
- Fuel 2,70	1%	
- Electricity 3,50	1%	

## APPENDIX VisualBasic code for costs and incomes computation in AGROPOL

```

Function Calcul_cost() As Boolean

filtrePARTNER = "[partner_key]=" & [Partner]
filtreCONTEXT = "[context_key]=" & [Context]
filtrePARAM = "[param_key]=" & [Param]
filtrePACK = "[pack_key]=" & [Package]

discount_rate = DLookup("[discount_rate]", "TEKparam", filtrePARAM)
currency_code = DLookup("[currency_code]", "TEKpack", filtrePACK)
currency_year = DLookup("[currency_year]", "TEKpack", filtrePACK)

' Attention : prévoir utilisation fréquence job
' Attention : prévoir utilisation year=n et discount rate
' Attention : veiller que unités de surface/volume/etc ne perturbent pas

' FIXED COSTS
' -----

cost_fixed_land = DLookup("[land_price]", "TEKparam", filtrePARAM)

cost_depreciation = _
  DSum(" "
    & "((1-(1-[asset_depreciation_rate])^[asset_depreciation_life])/ " _
    & "[asset_depreciation_life]*[asset_price])/ " _
    & "([asset_use_annual]/[asset_performance]) " _
    & "* [asset_speed]*24*[asset_coverage]", " " _
    & "Q_Cost_Asset")

cost_interest = _
  DSum(" "
    & "(((1-(1-[asset_depreciation_rate])^[asset_depreciation_life])/ " _
    & "[asset_depreciation_life]*[asset_price])*[interest_lt_rate]/[asset_depreciation_rate])/ " _
    & "([asset_use_annual]/[asset_performance]) " _
    & "* [asset_speed]*24*[asset_coverage]", " " _
    & "Q_Cost_Asset")

cost_tax = _
  DSum(" "
    & "([asset_price]*[asset_tax_rate])/ " _
    & "([asset_use_annual]/[asset_performance]) " _
    & "* [asset_speed]*24*[asset_coverage]", " " _
    & "Q_Cost_Asset")

cost_insurance = _
  DSum(" "
    & "([asset_price]*[asset_insure_rate])/ " _
    & "([asset_use_annual]/[asset_performance]) " _
    & "* [asset_speed]*24*[asset_coverage]", " " _
    & "Q_Cost_Asset")

cost_shelter = _
  DSum(" "
    & "([asset_price]*[asset_shelter_rate])/ " _
    & "([asset_use_annual]/[asset_performance]) " _
    & "* [asset_speed]*24*[asset_coverage]", " " _
    & "Q_Cost_Asset")

cost_fixed_asset = _
  Round(Nz([cost_depreciation]) + Nz([cost_interest])
    + Nz([cost_tax]) + Nz([cost_insurance]) + Nz([cost_shelter]), 2)

cost_fixed = Nz([cost_fixed_land]) + Nz([cost_fixed_asset])

' VARIABLE COSTS
' -----

cost_rm = _
  DSum(" "
    & "[asset_rm_cost] " _
    & "* [asset_speed]*24*[asset_coverage]", " " _
    & "Q_Cost_Asset")
' Attention : " * [uu_X1]" dans formule initiale

cost_fuel = _
  DSum(" "
    & "[asset_power]*[asset_load]*[asset_fuel_conso]*[diesel_price] " _
    & "* [asset_speed]*24*[asset_coverage]", " " _
    & "Q_Cost_Asset")
' Attention : diesel_price provisoire (prévoir divers prix fuel

```

```

cost_lube = _
  DSum(" " _
    & "([asset_lube_carter]/[asset_lube_change])*1.25*[lube_price] " _
    & "*[asset_speed]*24*[asset_coverage]", " " _
    & "Q_Cost_Asset")

' cost_electricity = _
' Attention : prévoir calcul à terme

cost_variable_asset = _
  Round(Nz([cost_rm]) + Nz([cost_fuel])
    + Nz([cost_lube]) + Nz([cost_electricity]), 2)

cost_labour1 = _
  DSum(" " _
    & "[labour1_time]*24*labour_level1_price", " " _
    & "Q_Cost_labour")

cost_labour2 = _
  DSum(" " _
    & "[labour2_time]*24*labour_level2_price", " " _
    & "Q_Cost_labour")

cost_labour3 = _
  DSum(" " _
    & "[labour3_time]*24*labour_level3_price", " " _
    & "Q_Cost_labour")

cost_variable_labour = _
  Round(Nz([cost_labour1]) + Nz([cost_labour2])
    + Nz([cost_labour3]), 2)

cost_input_seed = DSum("[inseed_cost]", "TEKinput_seed", filtrePACK)
cost_input_manure = DSum("[inmanure_cost]", "TEKinput_manure", filtrePACK)
cost_input_fertilizer = DSum("[infertilizer_cost]", "TEKinput_fertilizer", filtrePACK)
cost_input_pesticide = DSum("[inpesticide_cost]", "TEKinput_pesticide", filtrePACK)
cost_input_water = DSum("[inwater_cost]", "TEKinput_water", filtrePACK)
cost_input_fuel = DSum("[infuel_cost]", "TEKinput_fuel", filtrePACK)
cost_input_electricity = DSum("[inelectricity_cost]", "TEKinput_electricity", filtrePACK)

cost_variable_input = _
  Round(Nz([cost_input_seed]) + Nz([cost_input_manure]) + Nz([cost_input_fertilizer])
    + Nz([cost_input_pesticide]) + Nz([cost_input_water]) + Nz([cost_input_fuel])
    + Nz([cost_input_electricity]), 2)

cost_variable = cost_variable_asset + cost_variable_labour + cost_variable_input

cost_total = cost_fixed + cost_variable

' INCOMES
' -----

income_sale = DSum("[output_qty]*[output_price]", "TEKoutput", filtrePACK)
pack_subsidy = DLookup("[pack_subsidy]", "TEKpack", filtrePACK)
income_subsidy = pack_subsidy + DSum("[output_qty]*[output_subsidy]", "TEKoutput", filtrePACK)
income_total = Nz(income_sale) + Nz(income_subsidy)
profit_gross = income_total - cost_variable_input
profit_net = income_total - cost_total
profit = profit_net

```

## Annexe 2. Les pays Agribiom et leur classement en région MEA

Pays (nom anglais)	(nom français)	Période statistique	Région MEA	
Albania	Albanie	1961-2003	OECD	OECD 1990
Algeria	Algérie	1961-2003	MENA	Middle East and North Africa
Angola	Angola	1961-2003	SSA	Sub-Saharan Africa
Argentina	Argentine	1961-2003	LAM	Latin America
Armenia	Arménie	1992-2003	FSU	Former Soviet Union
Australia	Australie	1961-2003	OECD	OECD 1990
Austria	Autriche	1961-2003	OECD	OECD 1990
Azerbaijan, Republic of	Azerbaïdjan, Républiq de	1992-2003	FSU	Former Soviet Union
Bangladesh	Bangladesh	1961-2003	ASIA	Asia
Belarus	Bélarus	1992-2003	FSU	Former Soviet Union
Belgium-Luxembourg	Belgique-Luxembourg	1961-2003	OECD	OECD 1990
Benin	Bénin	1961-2003	SSA	Sub-Saharan Africa
Bolivia	Bolivie	1961-2003	LAM	Latin America
Bosnia and Herzegovina	Bosnie-Herzégovine	1992-2003	OECD	OECD 1990
Botswana	Botswana	1961-2003	SSA	Sub-Saharan Africa
Brazil	Brésil	1961-2003	LAM	Latin America
Bulgaria	Bulgarie	1961-2003	OECD	OECD 1990
Burkina Faso	Burkina Faso	1961-2003	SSA	Sub-Saharan Africa
Burundi	Burundi	1961-2003	SSA	Sub-Saharan Africa
Cambodia	Cambodge	1961-2003	ASIA	Asia
Cameroon	Cameroun	1961-2003	SSA	Sub-Saharan Africa
Canada	Canada	1961-2003	OECD	OECD 1990
Central African Republic	Centrafricaine, Rép	1961-2003	SSA	Sub-Saharan Africa
Chad	Tchad	1961-2003	SSA	Sub-Saharan Africa
Chile	Chili	1961-2003	LAM	Latin America
China	Chine	1961-2003	ASIA	Asia
Colombia	Colombie	1961-2003	LAM	Latin America
Congo, Dem Republic of	Congo, Rép dém du	1961-2003	SSA	Sub-Saharan Africa
Congo, Republic of	Congo, République du	1961-2003	SSA	Sub-Saharan Africa
Costa Rica	Costa Rica	1961-2003	LAM	Latin America
Côte d'Ivoire	Côte d'Ivoire	1961-2003	SSA	Sub-Saharan Africa
Croatia	Croatie	1992-2003	OECD	OECD 1990
Cuba	Cuba	1961-2003	LAM	Latin America
Czech Republic	Tchèque, République	1993-2003	OECD	OECD 1990
Czechoslovakia	Tchécoslovaquie	1961-1992	OECD	OECD 1990
Denmark	Danemark	1961-2003	OECD	OECD 1990
Dominican Republic	Dominicaine, République	1961-2003	LAM	Latin America
Ecuador	Équateur	1961-2003	LAM	Latin America
Egypt	Égypte	1961-2003	MENA	Middle East and North Africa
El Salvador	El Salvador	1961-2003	LAM	Latin America
Eritrea	Érythrée	1993-2003	SSA	Sub-Saharan Africa
Estonia	Estonie	1992-2003	OECD	OECD 1990
Ethiopia	Éthiopie	1993-2003	SSA	Sub-Saharan Africa
Ethiopia PDR	Ethiopie RDP	1961-1992	SSA	Sub-Saharan Africa
Finland	Finlande	1961-2003	OECD	OECD 1990
France	France	1961-2003	OECD	OECD 1990
Gabon	Gabon	1961-2003	SSA	Sub-Saharan Africa
Gambia	Gambie	1961-2003	SSA	Sub-Saharan Africa
Georgia	Géorgie	1992-2003	FSU	Former Soviet Union
Germany	Allemagne	1961-2003	OECD	OECD 1990
Ghana	Ghana	1961-2003	SSA	Sub-Saharan Africa
Greece	Grèce	1961-2003	OECD	OECD 1990
Guatemala	Guatemala	1961-2003	LAM	Latin America
Guinea	Guinée	1961-2003	SSA	Sub-Saharan Africa
Guinea-Bissau	Guinée-Bissau	1961-2003	SSA	Sub-Saharan Africa
Guyana	Guyana	1961-2003	LAM	Latin America
Haiti	Haiti	1961-2003	LAM	Latin America
Honduras	Honduras	1961-2003	LAM	Latin America
Hungary	Hongrie	1961-2003	OECD	OECD 1990
Iceland	Islande	1961-2003	OECD	OECD 1990
India	Inde	1961-2003	ASIA	Asia
Indonesia	Indonésie	1961-2003	ASIA	Asia
Iran, Islamic Rep of	Iran, Rép islamique d'	1961-2003	MENA	Middle East and North Africa
Ireland	Irlande	1961-2003	OECD	OECD 1990
Israel	Israël	1961-2003	MENA	Middle East and North Africa
Italy	Italie	1961-2003	OECD	OECD 1990
Jamaica	Jamaïque	1961-2003	LAM	Latin America
Japan	Japon	1961-2003	OECD	OECD 1990
Jordan	Jordanie	1961-2003	MENA	Middle East and North Africa
Kazakhstan	Kazakhstan	1992-2003	FSU	Former Soviet Union

Kenya	Kenya	1961-2003	SSA	Sub-Saharan Africa
Korea, Dem People's Rep	Corée, Rép pop dem	1961-2003	ASIA	Asia
Korea, Republic of	Corée, République de	1961-2003	ASIA	Asia
Kuwait	Koweït	1961-2003	MENA	Middle East and North Africa
Kyrgyzstan	Kirghizistan	1992-2003	FSU	Former Soviet Union
Laos	Laos	1961-2003	ASIA	Asia
Latvia	Lettonie	1992-2003	OECD	OECD 1990
Lebanon	Liban	1961-2003	MENA	Middle East and North Africa
Lesotho	Lesotho	1961-2003	SSA	Sub-Saharan Africa
Liberia	Libéria	1961-2003	SSA	Sub-Saharan Africa
Libyan Arab Jamahiriya	Libyen, Jamahiriya arabe	1961-2003	MENA	Middle East and North Africa
Lithuania	Lituanie	1992-2003	OECD	OECD 1990
Macedonia, The Fmr Yug Rp	Macédoine, l'ex-Rép Youg	1992-2003	OECD	OECD 1990
Madagascar	Madagascar	1961-2003	SSA	Sub-Saharan Africa
Malawi	Malawi	1961-2003	SSA	Sub-Saharan Africa
Malaysia	Malaisie	1961-2003	ASIA	Asia
Mali	Mali	1961-2003	SSA	Sub-Saharan Africa
Mauritania	Mauritanie	1961-2003	SSA	Sub-Saharan Africa
Mexico	Mexique	1961-2003	LAM	Latin America
Moldova, Republic of	Moldova, République de	1992-2003	FSU	Former Soviet Union
Mongolia	Mongolie	1961-2003	ASIA	Asia
Morocco	Maroc	1961-2003	MENA	Middle East and North Africa
Mozambique	Mozambique	1961-2003	SSA	Sub-Saharan Africa
Myanmar	Myanmar	1961-2003	ASIA	Asia
Namibia	Namibie	1961-2003	SSA	Sub-Saharan Africa
Nepal	Népal	1961-2003	ASIA	Asia
Netherlands	Pays-Bas	1961-2003	OECD	OECD 1990
New Zealand	Nouvelle-Zélande	1961-2003	OECD	OECD 1990
Nicaragua	Nicaragua	1961-2003	LAM	Latin America
Niger	Niger	1961-2003	SSA	Sub-Saharan Africa
Nigeria	Nigéria	1961-2003	SSA	Sub-Saharan Africa
Norway	Norvège	1961-2003	OECD	OECD 1990
Pakistan	Pakistan	1961-2003	ASIA	Asia
Panama	Panama	1961-2003	LAM	Latin America
Paraguay	Paraguay	1961-2003	LAM	Latin America
Peru	Pérou	1961-2003	LAM	Latin America
Philippines	Philippines	1961-2003	ASIA	Asia
Poland	Pologne	1961-2003	OECD	OECD 1990
Portugal	Portugal	1961-2003	OECD	OECD 1990
Romania	Roumanie	1961-2003	OECD	OECD 1990
Russian Federation	Fédération de Russie	1992-2003	FSU	Former Soviet Union
Rwanda	Rwanda	1961-2003	SSA	Sub-Saharan Africa
Saudi Arabia	Arabie saoudite	1961-2003	MENA	Middle East and North Africa
Senegal	Sénégal	1961-2003	SSA	Sub-Saharan Africa
Sierra Leone	Sierra Leone	1961-2003	SSA	Sub-Saharan Africa
Slovakia	Slovaquie	1993-2003	OECD	OECD 1990
Slovenia	Slovénie	1992-2003	OECD	OECD 1990
Solomon Islands	Salomon, Iles	1961-2003	ASIA	Asia
South Africa	Afrique du Sud	1961-2003	SSA	Sub-Saharan Africa
Spain	Espagne	1961-2003	OECD	OECD 1990
Sri Lanka	Sri Lanka	1961-2003	ASIA	Asia
Sudan	Soudan	1961-2003	SSA	Sub-Saharan Africa
Suriname	Suriname	1961-2003	LAM	Latin America
Swaziland	Swaziland	1961-2003	SSA	Sub-Saharan Africa
Sweden	Suède	1961-2003	OECD	OECD 1990
Switzerland	Suisse	1961-2003	OECD	OECD 1990
Syrian Arab Republic	Syrienne, Rép arabe	1961-2003	MENA	Middle East and North Africa
Tajikistan	Tadjikistan	1992-2003	FSU	Former Soviet Union
Tanzania, United Rep of	Tanzanie, Rép unie de	1961-2003	SSA	Sub-Saharan Africa
Thailand	Thaïlande	1961-2003	ASIA	Asia
Timor-Leste	Timor oriental	1961-2003	ASIA	Asia
Togo	Togo	1961-2003	SSA	Sub-Saharan Africa
Tunisia	Tunisie	1961-2003	MENA	Middle East and North Africa
Turkey	Turquie	1961-2003	MENA	Middle East and North Africa
Turkmenistan	Turkménistan	1992-2003	FSU	Former Soviet Union
Uganda	Ouganda	1961-2003	SSA	Sub-Saharan Africa
Ukraine	Ukraine	1992-2003	FSU	Former Soviet Union
United Arab Emirates	Émirats arabes unis	1961-2003	MENA	Middle East and North Africa
United Kingdom	Royaume-Uni	1961-2003	OECD	OECD 1990
United States of America	États-Unis d'Amérique	1961-2003	OECD	OECD 1990
Uruguay	Uruguay	1961-2003	LAM	Latin America
USSR (ex-)	URSS (ex-)	1961-1991	FSU	Former Soviet Union
Uzbekistan	Ouzbékistan	1992-2003	FSU	Former Soviet Union
Venezuela, Boliv Rep of	Venezuela, Rép boliv du	1961-2003	LAM	Latin America
Viet Nam	Viet Nam	1961-2003	ASIA	Asia
Yemen	Yémen	1961-2003	MENA	Middle East and North Africa

Yugoslavia SFR  
Zambia  
Zimbabwe

Yougoslavie FRS  
Zambie  
Zimbabwe

1961-1991  
1961-2003  
1961-2003

OECD OECD 1990  
SSA Sub-Saharan Africa  
SSA Sub-Saharan Africa

### Annexe 3. Les lignes CDU classées en biomasses alimentaires

Biomasse (nom français)	(nom anglais)	Classement (compartiment)	(espèce)
Blé	Wheat	Végétaux	Cere
Riz (Eq Blanchi)	Rice (Milled Eq)	Végétaux	Cere
Huile de Son de Riz	Ricebran Oil	Végétaux	Cere
Orge	Barley	Végétaux	Cere
Maïs	Maize	Végétaux	Cere
Huile de Germe de Maïs	Maize Germ Oil	Végétaux	Cere
Seigle	Rye	Végétaux	Cere
Avoine	Oats	Végétaux	Cere
Millet	Millet	Végétaux	Cere
Sorgho	Sorghum	Végétaux	Cere
Céréales, Autres	Cereals, Other	Végétaux	Cere
Sons	Brans	Végétaux	Cere
Manioc	Cassava	Végétaux	Root
Pommes de Terre	Potatoes	Végétaux	Root
Patates Douce	Sweet Potatoes	Végétaux	Root
Ignames	Yams	Végétaux	Root
Racines, Nda	Roots, Other	Végétaux	Root
Canne à Sucre	Sugar Cane	Végétaux	Suga
Betteraves à Sucre	Sugar Beet	Végétaux	Suga
Sucre, Non-Centrifuge	Sugar, Non-Centrifugal	Végétaux	Suga
Sucre, Eq Brut	Sugar, Raw Equivalent	Végétaux	Suga
Mélasses	Molasses	Végétaux	Suga
Haricots	Beans	Végétaux	Puls
Pois	Peas	Végétaux	Puls
Légumineuses, Autres	Pulses, Other	Végétaux	Puls
Fruit Coque	Treenuts	Végétaux	Olea
Soja (Fèves)	Soyabeans	Végétaux	Olea
Arachides (Décortiquées)	Groundnuts (Shelled Eq)	Végétaux	Olea
Tournesol (Graines)	Sunflowerseed	Végétaux	Olea
Colza, Moutarde (Graines)	Rape & Mustardseed	Végétaux	Olea
Coton (Graines)	Cottonseed	Végétaux	Olea
Coco (Incl Coprah)	Coconuts (Incl Copra)	Végétaux	Olea
Sésame (Graines)	Sesameseed	Végétaux	Olea
Palme (Amandes)	Palmkernels	Végétaux	Olea
Olives	Olives	Végétaux	Olea
Plantes Oléifères, Autres	Oilcrops, Other	Végétaux	Olea
Huile de Soja	Soyabean Oil	Végétaux	Olea
Huile d'Arachide	Groundnut Oil	Végétaux	Olea
Huile de Tournesol	Sunflowerseed Oil	Végétaux	Olea
Huile de Colza, Moutarde	Rape & Mustard Oil	Végétaux	Olea
Huile Graines de Coton	Cottonseed Oil	Végétaux	Olea
Huile de Sésame	Sesameseed Oil	Végétaux	Olea
Huiles Végétales, Autres	Oilcrops Oil, Other	Végétaux	Olea
Tourteau de Soja	Soyabean Cake	Végétaux	Olea
Tourteau d'Arachide	Groundnut Cake	Végétaux	Olea
Tourteau de Tournesol	Sunflowerseed Cake	Végétaux	Olea
Tourteau de Colza/Moutarde	Rape and Mustard Cake	Végétaux	Olea
Tourteau de Coton	Cottonseed Cake	Végétaux	Olea
Tourteau de Sésame	Sesameseed Cake	Végétaux	Olea
Tourteau, Autres	Oilseed Cakes, Other	Végétaux	Olea
Huile de Palmistes	Palmkernel Oil	Végétaux	Olea
Huile de Palme	Palm Oil	Végétaux	Olea
Huile de Coco	Coconut Oil	Végétaux	Olea
Huile d'Olive	Olive Oil	Végétaux	Olea
Tourteau de Palmiste	Palmkernel Cake	Végétaux	Olea
Tourteau de Coprah	Copra Cake	Végétaux	Olea
Tomates	Tomatoes	Végétaux	Vege
Oignons	Onions	Végétaux	Vege
Légumes, Autres	Vegetables, Other	Végétaux	Vege
Oranges, Mandarines	Oranges, Mandarines	Végétaux	Fru
Citrons, Limes	Lemons, Limes	Végétaux	Fru
Pamplemousse	Grapefruit	Végétaux	Fru
Agrumes, Autres	Citrus, Other	Végétaux	Fru
Banane	Bananas	Végétaux	Fru
Plantains	Plantains	Végétaux	Fru
Pommes	Apples	Végétaux	Fru
Ananas	Pineapples	Végétaux	Fru
Datte	Dates	Végétaux	Fru
Raisin	Grapes	Végétaux	Fru
Fruits, Autres	Fruits, Other	Végétaux	Fru

Edulcorants, Autres	Sweeteners, Other	Végétaux	Othe
Miel	Honey	Végétaux	Othe
Piments	Pimento	Végétaux	Othe
Épices, Autres	Spices, Other	Végétaux	Othe
Divers Alimentaire	Misc. Food	Végétaux	Othe
Café	Coffee	Végétaux	Othe
Fève de Cacao	Cocoa Beans	Végétaux	Othe
Thé	Tea	Végétaux	Othe
Poivre	Pepper	Végétaux	Othe
Clou	Cloves	Végétaux	Othe
Vin	Wine	Végétaux	Alco
Bière	Beer	Végétaux	Alco
Boissons Fermentées	Beverages, Fermented	Végétaux	Alco
Boissons Alcooliques	Beverages, Alcoholic	Végétaux	Alco
Viande de Bovins	Bovine Meat	Ruminants	Rumi
Viande d'Ovins, Caprins	Mutton & Goat Meat	Ruminants	Rumi
Viande, Autres	Meat, Other	Ruminants	Rumi
Abats Comestible	Offals, Edible	Ruminants	Rumi
Lait (Excl Beurre)	Milk (Excl Butter)	Ruminants	Rumi
Beurre, Ghee	Butter, Ghee	Ruminants	Rumi
Crème	Cream	Ruminants	Rumi
Graisses Animales (Crue)	Fats, Animals (Raw)	Ruminants	Rumi
Farines de Viande	Meat Meal	Ruminants	Rumi
Viande de Suides	Pigmeat	Monogastriques	Pigs
Viande de Volailles	Poultry Meat	Monogastriques	Poul
Oeufs	Eggs	Monogastriques	Poul
Poissons d'Eau Douce	Freshwater Fish	Eaux douces	Aqua
Huiles de Poissons	Fish, Body Oil	Eaux marines	Mari
Huiles de Foie de Poisson	Fish, Liver Oil	Eaux marines	Mari
Perciform	Demersal Fish	Eaux marines	Mari
Poissons Pélagiques	Pelagic Fish	Eaux marines	Mari
Poissons Marins, Autres	Marine Fish, Other	Eaux marines	Mari
Crustacés	Crustaceans	Eaux marines	Mari
Céphalopodes	Cephalopods	Eaux marines	Mari
Mollusques, Autres	Molluscs, Other	Eaux marines	Mari
Viande d'Animaux Aquatiques	Meat, Aquatic Mammals	Eaux marines	Mari
Animaux Aquatiques, Autres	Aquatic Animals, Other	Eaux marines	Mari
Farines de Poisson	Fish Meal	Eaux marines	Mari
Plantes Aquatiques	Aquatic Plants	Eaux marines	Mari

## Annexe 4. Les populations humaines (1961-2005)

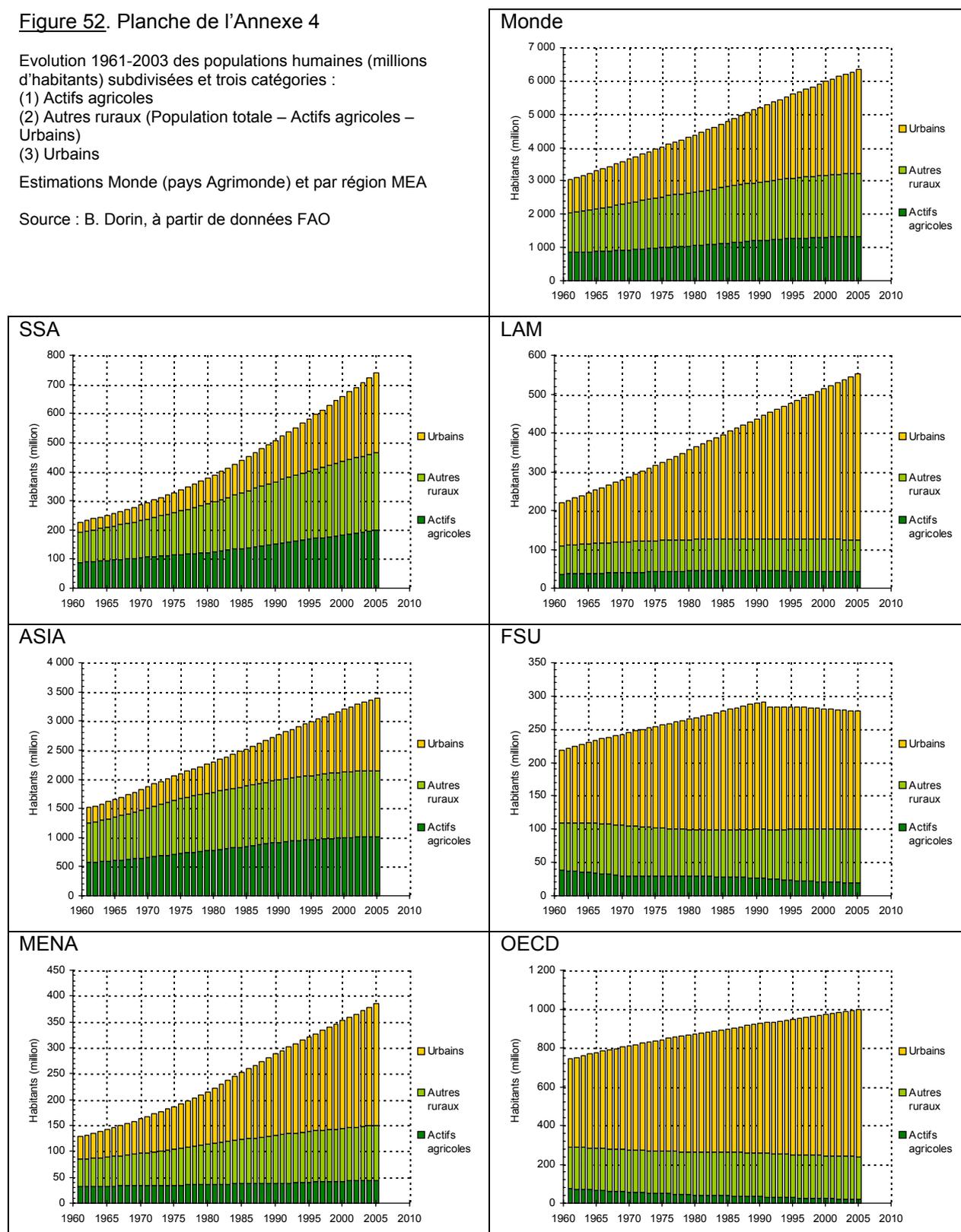
Figure 52. Planche de l'Annexe 4

Evolution 1961-2003 des populations humaines (millions d'habitants) subdivisées et trois catégories :

- (1) Actifs agricoles
- (2) Autres ruraux (Population totale – Actifs agricoles – Urbains)
- (3) Urbains

Estimations Monde (pays Agrimonde) et par région MEA

Source : B. Dorin, à partir de données FAO



## Annexe 5. Le disponible pour l'alimentation (1961-2003)

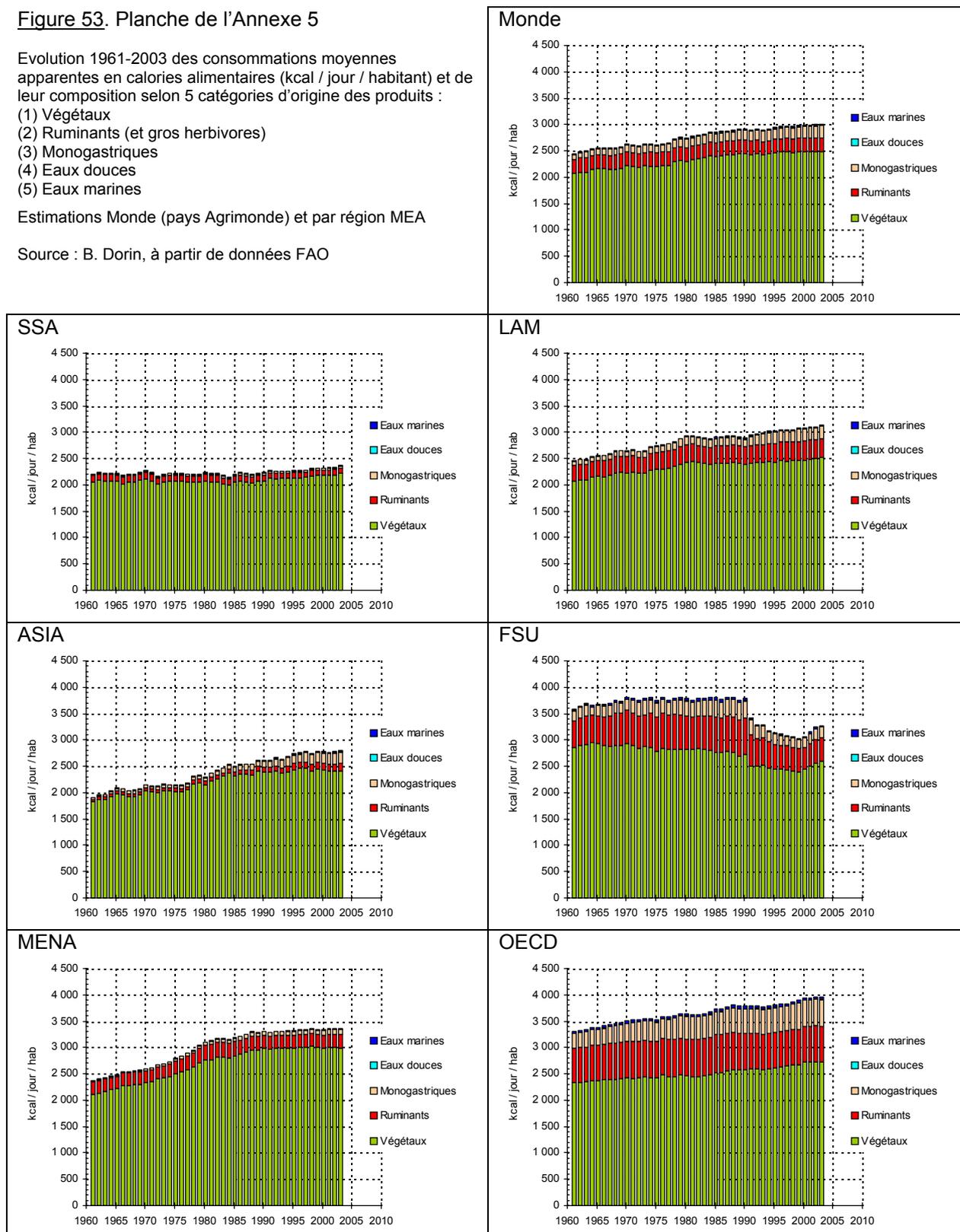
**Figure 53.** Planche de l'Annexe 5

Evolution 1961-2003 des consommations moyennes apparentes en calories alimentaires (kcal / jour / habitant) et de leur composition selon 5 catégories d'origine des produits :

- (1) Végétaux
- (2) Ruminants (et gros herbivores)
- (3) Monogastriques
- (4) Eaux douces
- (5) Eaux marines

Estimations Monde (pays Agrimonde) et par région MEA

Source : B. Dorin, à partir de données FAO



## Annexe 6. L'occupation des terres (1961-2005)

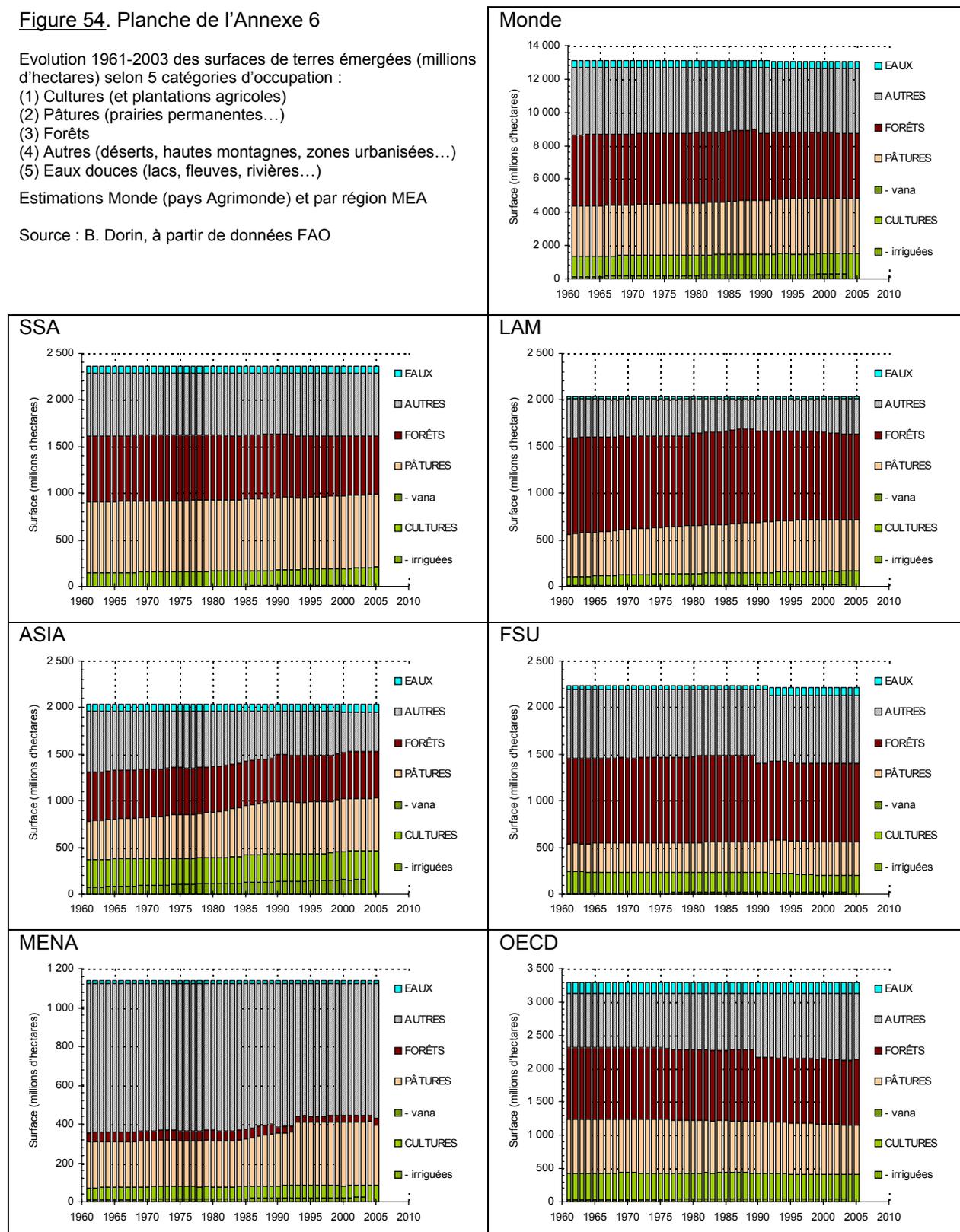
**Figure 54.** Planche de l'Annexe 6

Evolution 1961-2003 des surfaces de terres émergées (millions d'hectares) selon 5 catégories d'occupation :

- (1) Cultures (et plantations agricoles)
- (2) Pâtures (prairies permanentes...)
- (3) Forêts
- (4) Autres (déserts, hautes montagnes, zones urbanisées...)
- (5) Eaux douces (lacs, fleuves, rivières...)

Estimations Monde (pays Agrimonde) et par région MEA

Source : B. Dorin, à partir de données FAO



## Annexe 7. Les potentiels cultivables

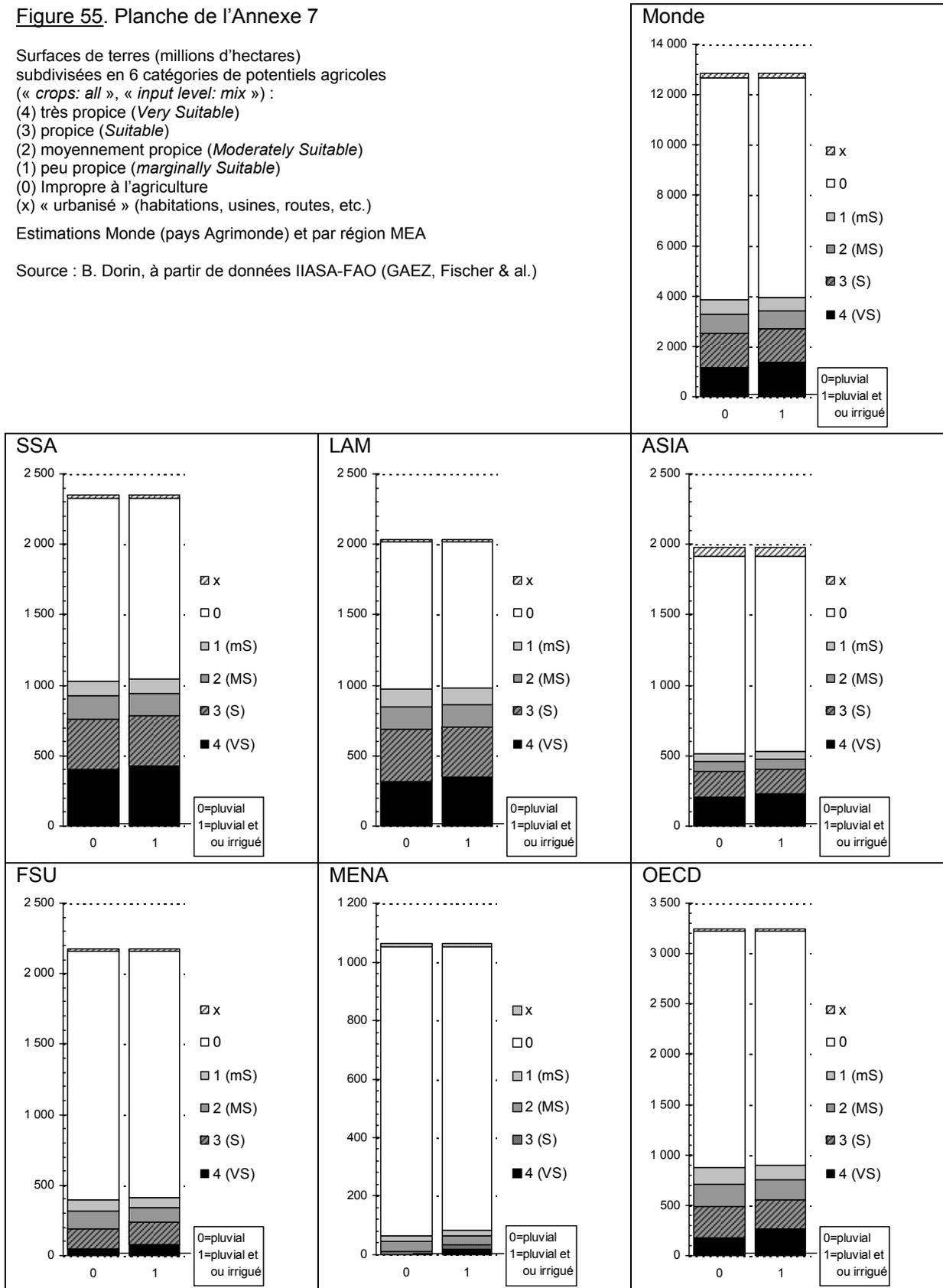
**Figure 55.** Planche de l'Annexe 7

Surfaces de terres (millions d'hectares)  
 subdivisées en 6 catégories de potentiels agricoles  
 (« crops: all », « input level: mix ») :

- (4) très propice (*Very Suitable*)
- (3) propice (*Suitable*)
- (2) moyennement propice (*Moderately Suitable*)
- (1) peu propice (*marginally Suitable*)
- (0) Impropre à l'agriculture
- (x) « urbanisé » (habitations, usines, routes, etc.)

Estimations Monde (pays Agrimonde) et par région MEA

Source : B. Dorin, à partir de données IIASA-FAO (GAEZ, Fischer & al.)



## Annexe 8. Les productions alimentaires (1961-2003)

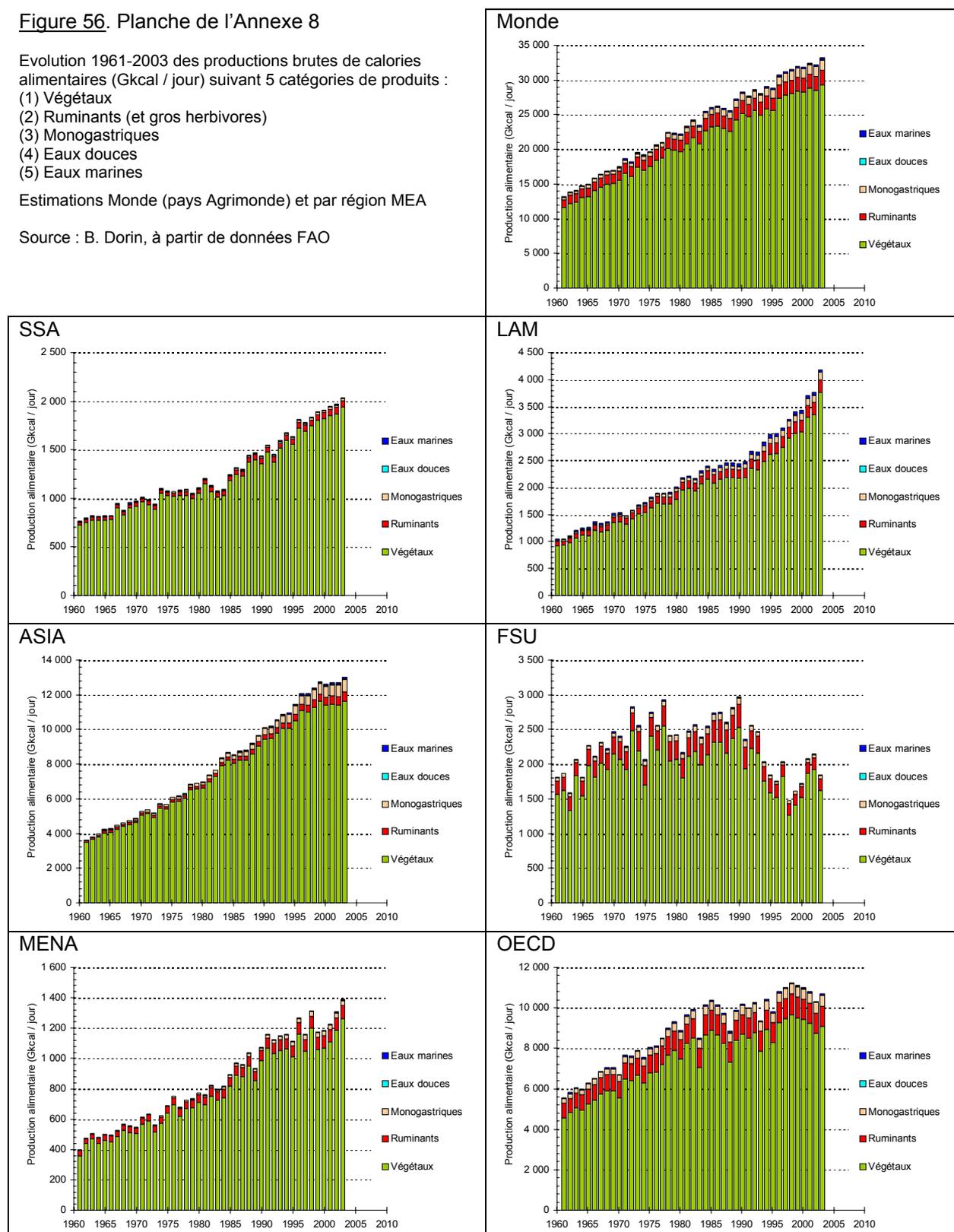
Figure 56. Planche de l'Annexe 8

Evolution 1961-2003 des productions brutes de calories alimentaires (Gkcal / jour) suivant 5 catégories de produits :

- (1) Végétaux
- (2) Ruminants (et gros herbivores)
- (3) Monogastriques
- (4) Eaux douces
- (5) Eaux marines

Estimations Monde (pays Agrimonde) et par région MEA

Source : B. Dorin, à partir de données FAO



## Annexe 9. La productivité des espaces (1961-2003)

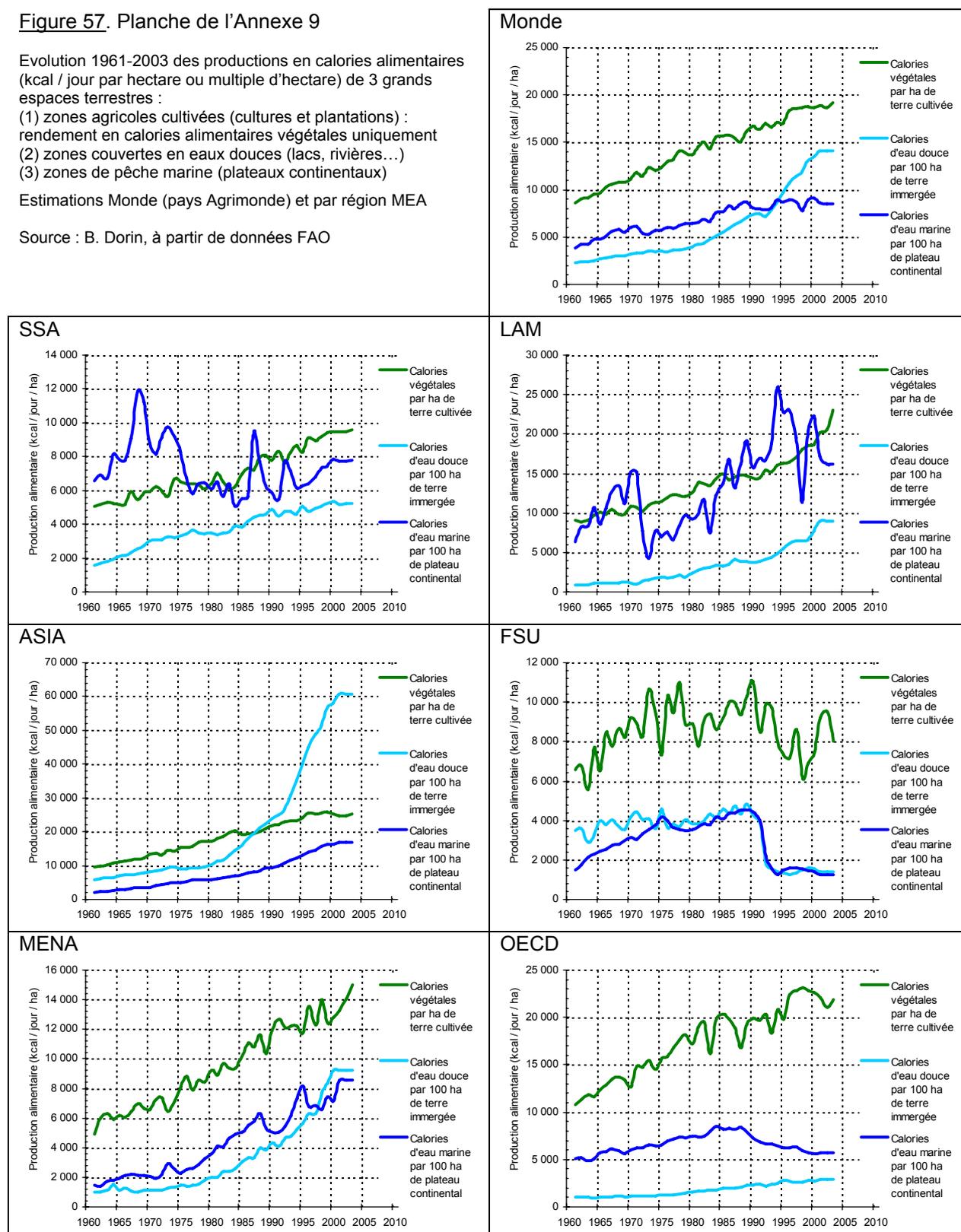
Figure 57. Planche de l'Annexe 9

Evolution 1961-2003 des productions en calories alimentaires (kcal / jour par hectare ou multiple d'hectare) de 3 grands espaces terrestres :

- (1) zones agricoles cultivées (cultures et plantations) : rendement en calories alimentaires végétales uniquement
- (2) zones couvertes en eaux douces (lacs, rivières...)
- (3) zones de pêche marine (plateaux continentaux)

Estimations Monde (pays Agrimonde) et par région MEA

Source : B. Dorin, à partir de données FAO



## Annexe 10. L'usage des produits alimentaires végétaux (1961-2003)

Figure 58. Planche A de l'Annexe 10

Evolution 1961-2003 des disponibilités en calories alimentaires végétales (Gkcal / jour) et de leur usage selon 6 catégories :

- (1) Alimentation humaine
- (2) Alimentation animale
- (3) Valorisations agricoles non-alimentaires (Vana)
- (4) Semences, reproduction
- (5) Pertes (entre récoltes et mises à disposition)
- (6) non connu, non-inventorié (i.e. Productions + Imports – Exports +/- ΔStocks – Usages inventoriés)

Estimations Monde (pays Agrimonde) et par région MEA

Source : B. Dorin, à partir de données FAO

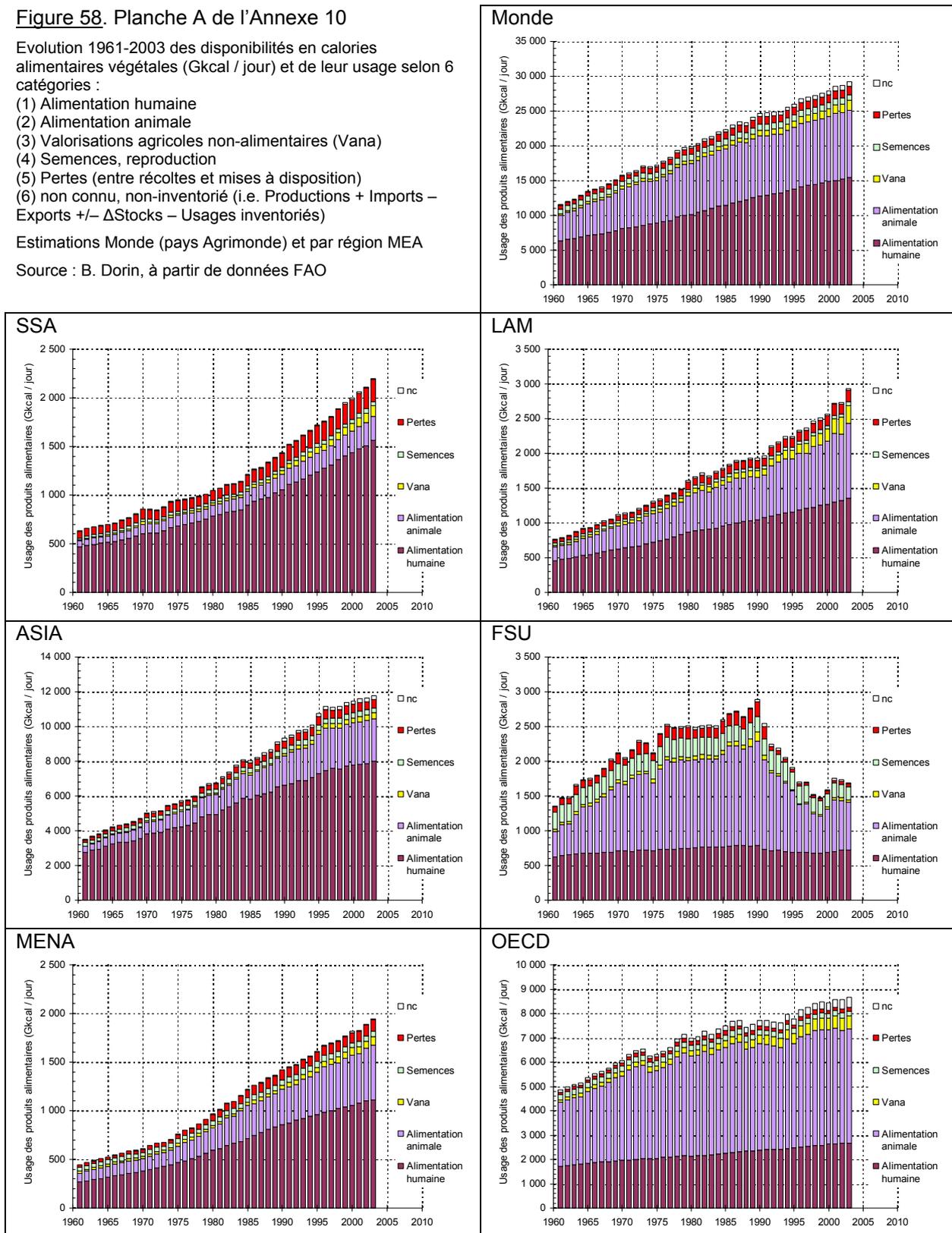
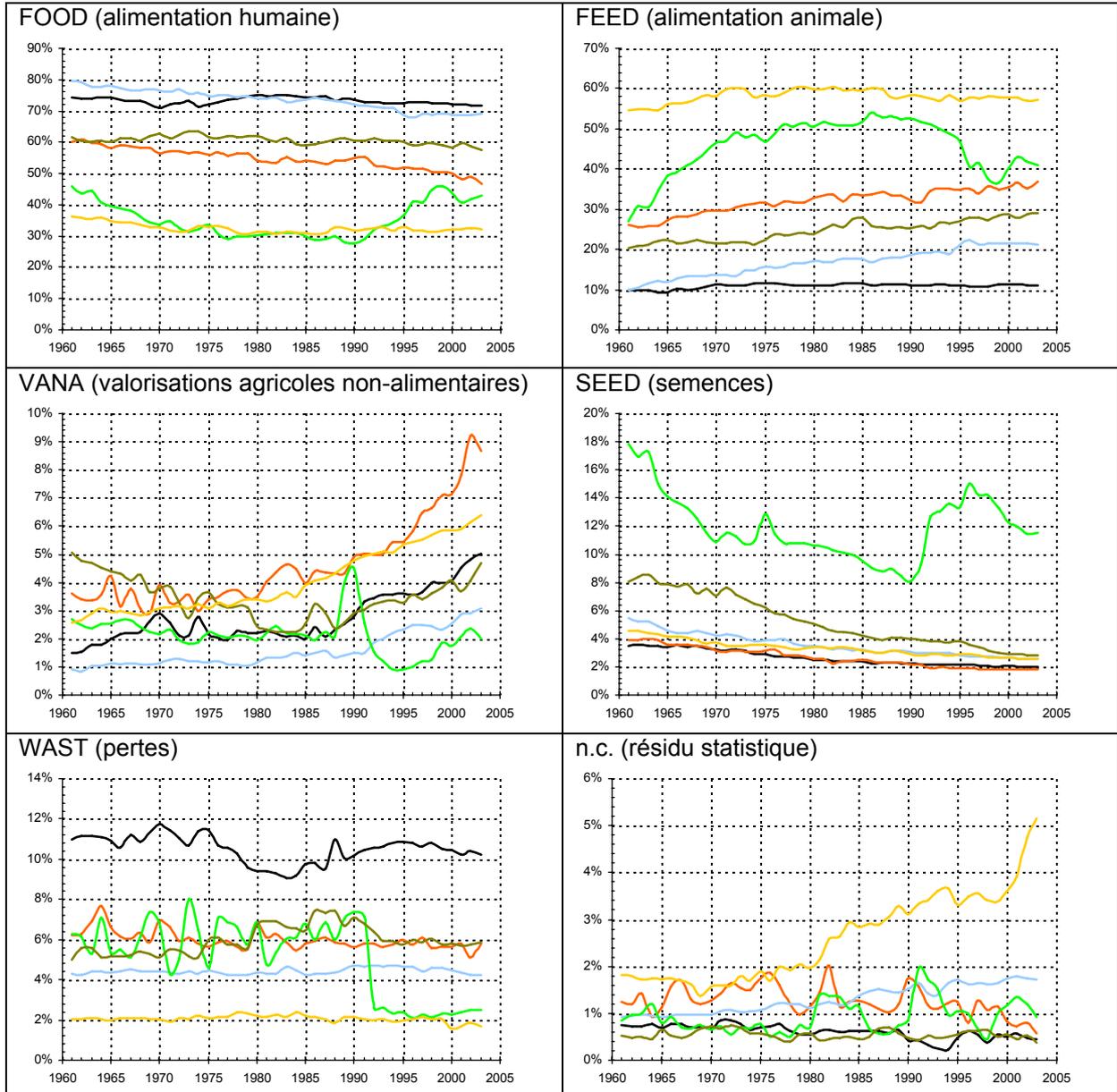


Figure 59. Planche B de l'Annexe 10

Evolutions 1961-2003 des parts d'usage de calories alimentaires disponibles sur le total des usages inventoriés (%) ; Estimations par région MEA (pays Agrimonde) pour 6 rubriques respectives :  
 FOOD = Alimentation humaine  
 FEED = Alimentation animale  
 VANA = Valorisations agricoles non-alimentaires  
 SEED = Semences  
 WAST = Pertes (entre récoltes et mises à disposition)  
 n.c. = non connu, non-inventorié (i.e. Productions + Imports – Exports +/- ΔStocks – Usages inventoriés)  
 Source : B. Dorin, à partir de données FAO

- SSA
- LAM
- ASIA
- FSU
- MENA
- OECD



## Annexe 11. Le commerce de produits alimentaires (1961-2003)

Figure 60. Planche de l'Annexe 11

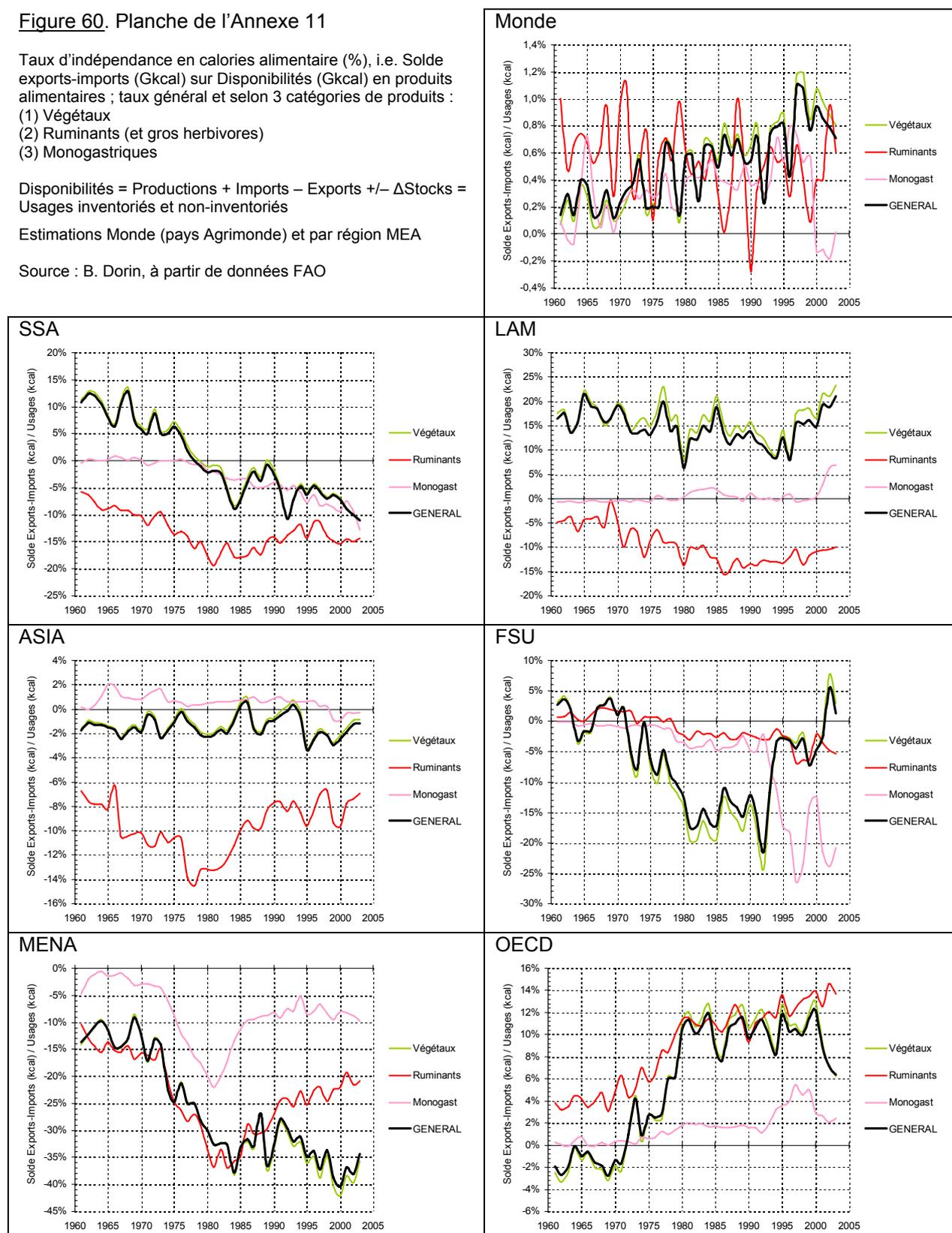
Taux d'indépendance en calories alimentaire (%), i.e. Solde exports-imports (Gkcal) sur Disponibilités (Gkcal) en produits alimentaires ; taux général et selon 3 catégories de produits :

- (1) Végétaux
- (2) Ruminants (et gros herbivores)
- (3) Monogastriques

Disponibilités = Productions + Imports – Exports +/- ΔStocks = Usages inventoriés et non-inventoriés

Estimations Monde (pays Agrimonde) et par région MEA

Source : B. Dorin, à partir de données FAO



## Annexe 12. Comparaison des productions animales observées et simulées (1961-2003)

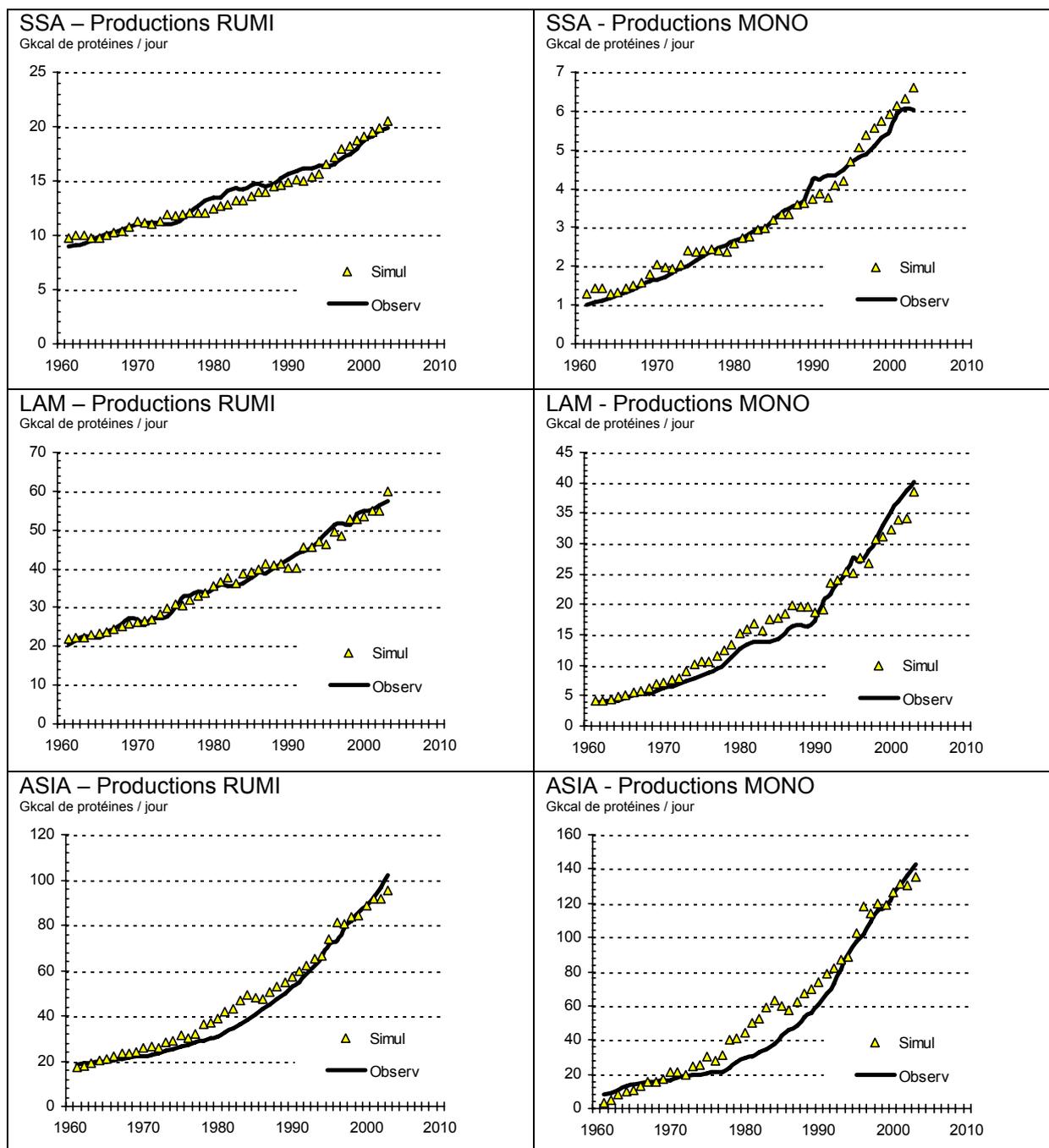
Figure 61. Planche de Annexe 12

Comparaison 1961-2003 des productions alimentaires animales observées (Gkcal de protéines) et simulées avec les fonctions régionales de production utilisées pour la prospective Agrimonde, suivant 2 catégories de produits :

- (1) Ruminants (et gros herbivores)
- (2) Monogastriques

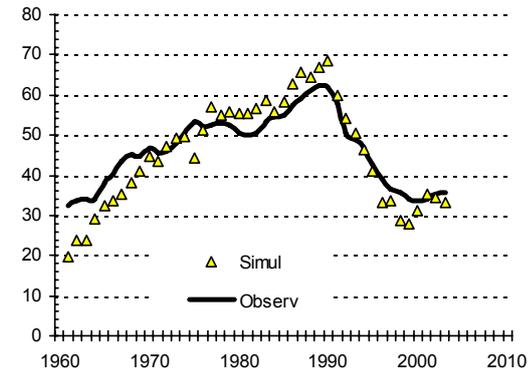
Estimations et simulations par région MEA

Source : B. Dorin, T. Le Cotty



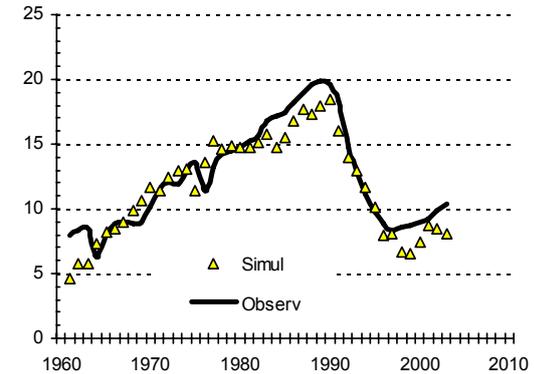
### FSU – Productions RUMI

Gkcal de protéines / jour



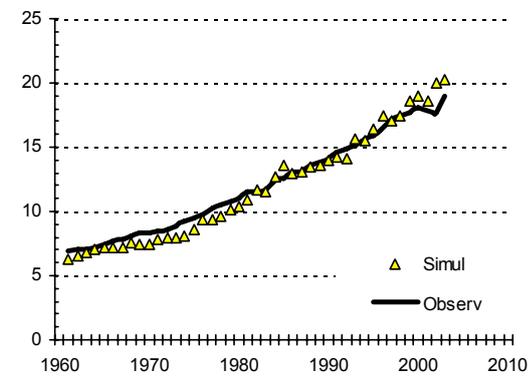
### FSU - Productions MONO

Gkcal de protéines / jour



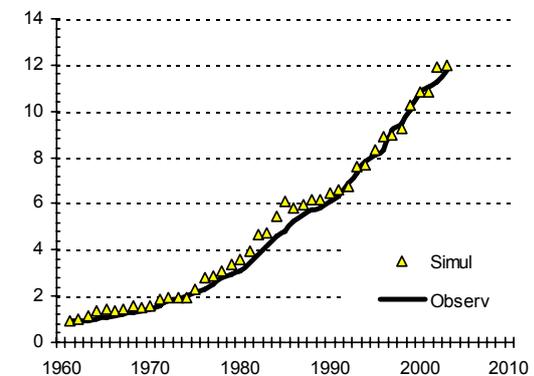
### MENA – Productions RUMI

Gkcal de protéines / jour



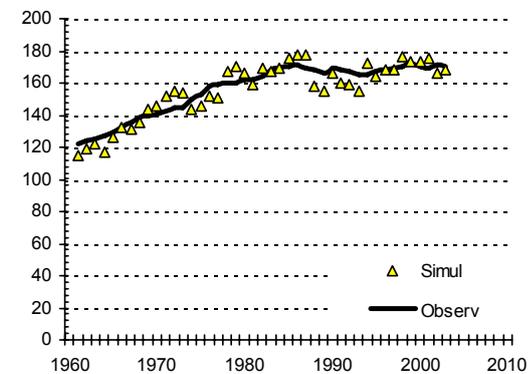
### MENA - Productions MONO

Gkcal de protéines / jour



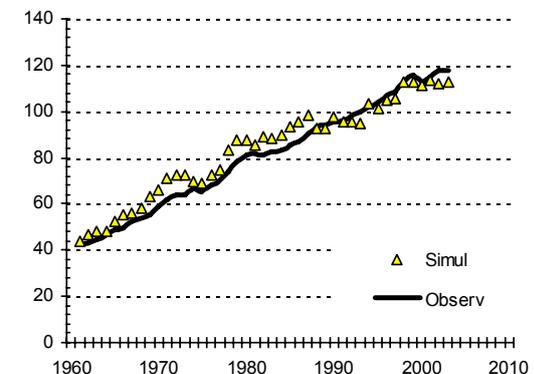
### OECD – Productions RUMI

Gkcal de protéines / jour



### OECD - Productions MONO

Gkcal de protéines / jour



## Annexe 13. Principales hypothèses des simulations Agrimonde (2050)

### (1) Hypothèses liées aux productions de calories alimentaires

			1961	2003	2050	2050	2050	2050
					AG1	AG1	AGO	AGO
					Variante 1	Variante 2	Variante 1	Variante 2
Surfaces (1000 ha)	cultivées	OECD	426495	415865	495000	495000	467000	467000
		SSA	143921	202262	339000	339000	303000	303000
		FSU	239800	201736	310000	310000	223000	223000
		ASIA	368545	461249	560000	560000	504000	504000
		LAM	102362	163882	310000	310000	266000	266000
		MENA	73112	84049	90000	90000	93000	93000
		Total	1354235	1529043	2104000	2104000	1856000	1856000
		dont non alimentaires	OECD	0	0	95000	95000	66000
	SSA	0	0	39000	39000	40000	40000	
	FSU	0	0	10000	10000	36000	36000	
	ASIA	0	0	20000	20000	28000	28000	
	LAM	0	0	60000	60000	47000	47000	
	MENA	0	0	200	200	56	56	
	Total	0	0	224200	224200	217056	217056	
	pâtures	OECD	816819	736014	576000	576000	608000	608000
	SSA	767346	783878	691000	691000	1161000	1161000	
	FSU	302000	360193	300000	300000	212000	212000	
	ASIA	415642	564777	512000	512000	735000	735000	
	LAM	461731	553323	444625	444625	548000	548000	
	MENA	234623	327803	321000	321000	320000	320000	
Total	2998161	3325988	2844625	2844625	3584000	3584000		
forêts	OECD	1070679	980752	1077644	1077644	1460000	1460000	
SSA	706733	625368	580425	580425	276000	276000		
FSU	913000	842734	843000	843000	1413000	1413000		
ASIA	526033	499932	445434	445434	367000	367000		
LAM	1030215	922491	900000	900000	937000	937000		
MENA	49193	33501	32965	32965	9000	9000		
Total	4295853	3904776	3828801	3828801	4462000	4462000		
Rendements (kcal/jour.ha)	VEGE	OECD	10742	21904	22600	22600	33507	33507
		SSA	5027	9582	11750	11750	23133	23133
		FSU	6549	8026	14500	14500	12825	12825
		ASIA	9485	25251	25100	25100	46416	46416
		LAM	9041	22979	23500	23500	36494	36494
		MENA	4921	15010	14500	14500	21362	21362
		Total	8607	19189	20027	20027	32942	32942
Productions animales (Gkcal/jour)	RUMI	OECD	711	1068	519	1034	1401	1735
		SSA	31	70	569	22	361	157
		FSU	185	160	88	551	291	323
		ASIA	89	500	773	232	1 635	1481
		LAM	80	240	262	447	484	734
		MENA	33	93	230	26	230	27
		Total	1128	2132	2441	2312	4402	4457
	MONO	OECD	215	497	113	491	757	1003
		SSA	4	23	283	0	167	61
		FSU	43	36	18	139	72	80
		ASIA	39	687	1145	249	2554	2299
		LAM	19	137	169	331	350	568
		MENA	3	33	105	0	105	0
		Total	323	1412	1833	1207	4005	4009

## (2) Hypothèses liées aux usages de calories alimentaires

			1961	2003	2050	2050	2050	2050	
					AG1	AG1	AGO	AGO	
					Variante 1	Variante 2	Variante 1	Variante 2	
Populations (1000 hab)	OECD	OECD	743048	986872	1066211	1066211	1066211	1066211	
		SSA	226577	705887	1662000	1662000	1662000	1662000	
		FSU	217854	279012	239212	239212	239212	239212	
		ASIA	1510658	3322361	4427101	4427101	4427101	4427101	
		LAM	219691	537949	773659	773659	773659	773659	
		MENA	128242	371745	631964	631964	631964	631964	
		Total	3046070	6203826	8800147	8800147	8800147	8800147	
Ration humaine (kcal/jour.hab)	VEGE	OECD	2325	2721	2500	2500	2385	2385	
		SSA	2057	2218	2500	2500	2667	2667	
		FSU	2854	2586	2500	2500	2091	2091	
		ASIA	1821	2404	2500	2500	2766	2766	
		LAM	2069	2528	2500	2500	2758	2758	
		MENA	2115	2995	2500	2500	2987	2987	
		Total	2066	2488	2500	2500	2698	2698	
	RUMI	OECD	659	675	251	251	925	925	
		SSA	121	102	129	129	214	214	
		FSU	503	451	251	251	947	947	
		ASIA	54	149	159	159	428	428	
		LAM	297	357	251	251	507	507	
		MENA	235	249	222	222	319	319	
		Total	264	265	180	180	461	461	
	MONO	OECD	282	512	200	200	703	703	
		SSA	17	33	350	350	69	69	
		FSU	196	213	212	212	349	349	
		ASIA	25	209	253	253	443	443	
		LAM	87	240	207	207	385	385	
		MENA	21	96	238	238	123	123	
		Total	104	233	259	259	373	373	
	Utilisations totales (Gkcal/jour)	VEGE	OECD	5164	8669	4856	8590	10939	13357
			SSA	632	2191	7515	4426	7378	6084
			FSU	1251	1580	1017	3900	2118	2318
			ASIA	3695	11807	16732	13554	23009	22094
			LAM	954	3109	3977	5425	5930	7913
			MENA	493	1985	3549	1752	4176	2223
Total			12190	29341	37646	37646	53551	53990	
RUMI		OECD	730	953	445	445	1425	1425	
		SSA	34	82	243	243	405	405	
		FSU	171	171	66	66	290	290	
		ASIA	61	542	795	795	2208	2212	
		LAM	97	267	273	273	534	534	
		MENA	43	117	178	178	254	254	
		Total	1135	2132	2000	2000	5116	5120	
MONO		OECD	183	484	187	187	733	729	
		SSA	7	26	609	608	122	122	
		FSU	33	49	40	40	73	73	
		ASIA	19	688	1122	1122	1980	1980	
		LAM	13	127	158	159	301	302	
		MENA	2	37	157	157	81	81	
		Total	257	1412	2274	2273	3291	3287	
dont alimentation animale (Gkcal/jour)		VEGE	OECD	2608	4712	1311	4672	6 911	9093
			SSA	62	245	2906	0	1 720	639
			FSU	365	686	350	2761	1 370	1537
			ASIA	342	2449	3896	1033	8 324	7509
			LAM	199	1078	1328	2586	2 730	4427
			MENA	90	561	1706	0	1 700	0
	Total		3665	9731	11497	11052	22 755	23206	
dont Vana (Gkcal/jour)	VEGE	OECD	123	528	284	497	635	775	
		SSA	9	110	0	0	301	249	
		FSU	36	34	17	68	36	39	
		ASIA	31	353	419	335	574	545	
		LAM	27	252	283	385	421	561	
		MENA	22	91	0	0	171	91	
		Total	249	1368	1003	1284	2138	2260	

# Tables des figures et tableaux

## Figures

Figure 1. Processus de fabrication des biocarburants .....	14
Figure 2. Choix et possibles options de délimitation d'une ACV sur l'éthanol de maïs .....	14
Figure 3. Structuration générale de traitement des données .....	30
Figure 4. Carte des six régions du MEA .....	32
Figure 5. Ecart Disponibilités-Usages / Usages pour les calories végétales (1961-2003) .....	42
Figure 6. Input calorique en FEED végétal / Output de calories alimentaires animales (1961-2003) .....	48
Figure 7. Input protéique en FEED végétal / Output de protéines alimentaires animales (1961-2003) .....	48
Figure 8. Productivité moyenne décroissante du FEED (1961-2003) .....	48
Figure 9. Populations humaines (1961-2003) .....	53
Figure 10. Actifs agricoles (1961-2003) .....	53
Figure 11. Calories alimentaires disponibles pour l'alimentation (1961-2003) .....	54
Figure 12. Calories alimentaires animales disponibles pour l'alimentation (1961-2003) .....	54
Figure 13. Surfaces agricoles cultivées (1961-2003) .....	56
Figure 14. Taux de mise en culture des surfaces potentiellement cultivables (1961-2003) .....	56
Figure 15. Surface agricole cultivée par actif agricole (1961-2003) .....	56
Figure 16. Productions alimentaires végétales (1961-2003) .....	58
Figure 17. Productions alimentaires végétales par hectare agricole cultivé (1961-2003) .....	58
Figure 18. Productions alimentaires végétales par actif agricole (1961-2003) .....	58
Figure 19. Usages mondiaux des produits alimentaires (1961-2003) .....	59
Figure 20. Solde Exports-Imports de produits alimentaires (1961-2003) .....	61
Figure 21. Solde Exports-Imports (kcal) / Usages (kcal) de produits alimentaires (1961-2003) .....	61
Figure 22. Usages des terres (2003) .....	67
Figure 23. Surfaces cultivées et EqSCL des usages d'aliments (2003) .....	67
Figure 24. Evolution des productions alimentaires, Scénario AGO (2003 & 2050) .....	69
Figure 25. Evolution des surfaces cultivées, Scénario AGO (2003 & 2050) .....	70
Figure 26. Surfaces cultivées et EqSCL des usages d'aliments, Scénario AGO_1 (2050) .....	70
Figure 27. Evolution des usages d'aliments en EqSCL, Scénario AGO_1 (2050) .....	71
Figure 28. Solde des échanges alimentaires, Scénario AGO (2050) .....	72
Figure 29. Evolution des productions alimentaires, Scénario AG1 (2003 & 2050) .....	74
Figure 30. Evolutions des surfaces cultivées, Scénario AG1 (2003 & 2050) .....	75
Figure 31. Surfaces cultivées et EqSCL des usages d'aliments, Scénario AG1_1 (2050) .....	75
Figure 32. Evolution des usages d'aliments en EqSCL, Scénario AG1_1 (2003 & 2050) .....	76
Figure 33. Solde des échanges alimentaires, Scénario AG1 (2050) .....	77
Figure 34. Productions alimentaires, Scénarios AGO_1 et AG1_1 (2050) .....	78
Figure 35. Surfaces cultivées, Scénarios AGO et AG1 (2050) .....	78
Figure 36. Usages d'aliments en EqSCL, Scénarios AGO_1 et AG1_1 (2050) .....	79
Figure 37. Elasticité-prix de la terre et marchés des facteurs de production (cas 1) .....	83
Figure 38. Elasticité-prix de la terre et marchés des facteurs de production (cas 2) .....	83
Figure 39. Le mécanisme de formation du prix de la terre dans la théorie Ricardienne .....	84
Figure 40. L'architecture récursive d' IMACLIM-R .....	86
Figure 41. Le fonctionnement intégré du Nexus-LandUse .....	87
Figure 42. Architecture du modèle Nexus-LU .....	88
Figure 43. Courbe de répartition dans l'espace du rendement végétal .....	89
Figure 44. Représentation graphique de $f_1(\rho)$ pour une classe de terre .....	90
Figure 45. Description du mode de répartition de la production animale entre intensif et extensif .....	93
Figure 46. Principales fonctions du modèle à l'état initial .....	98
Figure 47. Sensibilité du modèle à une variation du prix de l'énergie .....	98
Figure 48. Evolution de la surface agricole dédiée aux biocarburants selon 2 variantes (2001-2050) .....	99
Figure 49. Evolution des usages sols selon 3 variantes (2001, 2020, 2050) .....	100
Figure 50. Evolution du indice de rareté de la terre selon 3 variantes (2001-2050) .....	101
Figure 51. Evolution du rendement moyen selon 3 variantes (2001-2050) .....	101
Figure 52. Planche de l'Annexe 4 .....	141
Figure 53. Planche de l'Annexe 5 .....	142
Figure 54. Planche de l'Annexe 6 .....	143
Figure 55. Planche de l'Annexe 7 .....	144
Figure 56. Planche de l'Annexe 8 .....	145
Figure 57. Planche de l'Annexe 9 .....	146
Figure 58. Planche A de l'Annexe 10 .....	147
Figure 59. Planche B de l'Annexe 10 .....	148
Figure 60. Planche de l'Annexe 11 .....	149
Figure 61. Planche de Annexe 12 .....	150

## Tableaux

Tableau 1. Avantages et inconvénients apparents des biocarburants.....	12
Tableau 2. Bilan énergétique des carburants et biocarburants selon l'ADEME.....	14
Tableau 3. Bilan énergétique et bilan effet de serre des biocarburants de 1 <sup>ère</sup> génération.....	15
Tableau 4. Principaux facteurs d'émissions de GES par l'agriculture.....	17
Tableau 5. Variations d'estimation des populations humaines mondiales (2000 et 2050).....	34
Tableau 6. Variations d'estimation de surfaces terrestres mondiales (2003).....	35
Tableau 7. Fonctions nationales génériques de productions animales utilisées par Agrimonde.....	49
Tableau 8. Fonctions régionales génériques de productions animales utilisées par Agrimonde.....	49
Tableau 9. Fonctions nationales de productions animales RUMI utilisées par Agrimonde.....	49
Tableau 10. Fonctions nationales de productions animales MONO utilisées par Agrimonde.....	49
Tableau 11. Equilibre Emplois-Ressources par région MEA (2003).....	66
Tableau 12. Principales hypothèses de simulation AGO.....	68
Tableau 13. Résultats agrégés de la simulation AGO_1.....	69
Tableau 14. Résultats agrégés de la simulation AGO_2.....	71
Tableau 15. Principales hypothèses de simulation AG1.....	73
Tableau 16. Résultats agrégés de la simulation AG1_1.....	74
Tableau 17. Résultats agrégés de la simulation AG1_2.....	76

# Tables des matières

<b>Sommaire</b> .....	2
<b>Sigles, Glossaire</b> .....	4
<b>Introduction</b> .....	7
<b>1. Eco-ingénierie des biocarburants</b> .....	10
11. <i>Des bénéfices controversés, des enjeux agro-écologiques</i> .....	11
111. Introduction.....	11
112. La consommation énergétique.....	12
113. L'émission de gaz à effet de serre .....	16
114. Des controverses aux enjeux.....	18
115. Conclusion.....	20
12. <i>Enjeux agro-écologiques et enjeux de modélisation : l'interface Agropol</i> .....	22
121. Introduction.....	22
122. Les ambitions de l'outil .....	22
123. Le prototype.....	25
<b>2. Rétro-prospective des productions et usages mondiaux de biomasses alimentaires</b> .....	27
21. <i>La plateforme Agribiom</i> .....	28
211. Objectifs de l'outil .....	28
212. Organisation générale des traitements .....	30
213. Couvertures temporelle et géographique.....	31
214. Populations humaines .....	33
215. Utilisation des terres.....	34
216. Potentiels cultivables .....	36
217. Bilans ressources-emplois de biomasses alimentaires .....	38
218. Biomasses non-alimentaires .....	42
219. Modèles de productions animales.....	43
2110. Interface et simulations interactives .....	50
22. <i>Rétrospective 1961-2003</i> .....	53
221. Populations humaines .....	53
222. Consommations alimentaires.....	54
223. Occupation des terres .....	55
224. Productions et productivités alimentaires.....	57
225. Usages des produits alimentaires .....	59
226. Commerce alimentaire .....	60
23. <i>Prospectives 2050</i> .....	62
231. Des principes de scénarios .....	62
2311. L'Orchestration globale (scénario AGO) .....	62
2312. La Révolution doublement verte (scénario AG1) .....	63
232. Des principes de bouclage.....	64
2321. Préférence pour l'importation de calories végétales (simulations AGO_1 et AG1_1) ....	64
2322. Préférence pour l'importation de calories animales (simulations AGO_2 et AG1_2) ....	65
233. La situation de référence 2003.....	66
234. Simulations du scénario Agrimonde AGO.....	68
2341. Hypothèses quantitatives .....	68
2342. Variante 1 (AGO_1).....	69
2343. Variante 2 (AGO_2).....	71
2345. Brèves conclusions.....	72

235. Simulations du scenario Agrimonde « AG1» .....	73
2351. Hypothèses quantitatives .....	73
2352. Variante 1 (AG1_1).....	73
2353. Variante 2 (AG1_2).....	76
2354. Brèves conclusions.....	77
236. Conclusion des simulations.....	77
<b>3. Modélisation hybride de l'équilibre partiel des terres disponibles.....</b>	<b>80</b>
31. <i>Principes généraux du Nexus-LandUse</i> .....	81
311. Un modèle mondial d'allocation des sols .....	81
312. Le mécanisme théorique de formation du prix de la terre.....	82
313. L'intégration du Nexus-LandUse dans Imaclim-R.....	84
3131. Le modèle Imaclim-R.....	85
3132. Fonctionnement du Nexus-LU au sein d'Imaclim-R.....	86
3133. Niveau d'agrégation.....	87
32. <i>Descriptif complet du prototype</i> .....	88
321. Architecture du modèle .....	88
322. Ecriture du module dynamique.....	89
3221. Etape 1 – Modélisation des choix techniques et des modes de production .....	89
3222. Etape 2 – Modélisation de la demande .....	93
3223. Etape 3 – Modélisation de l'offre .....	95
3224. Etape 4 – Détermination du prix de la terre à partir de l'équilibre offre-demande .....	95
33. <i>Analyse des sorties du modèle</i> .....	96
331. Tests de sensibilité.....	96
332. Résultats d'un premier exercice de projection .....	99
3331. Hypothèses de projection .....	99
3332. Analyse des sorties .....	100
34. <i>Conclusions</i> .....	103
<b>ANNEXES .....</b>	<b>104</b>
Annexe 1. Le modèle-ingénieur Agropol.....	105
Annexe 2. Les pays Agribiom et leur classement en région MEA .....	136
Annexe 3. Les lignes CDU classées en biomasses alimentaires .....	139
Annexe 4. Les populations humaines (1961-2005) .....	141
Annexe 5. Le disponible pour l'alimentation (1961-2003).....	142
Annexe 6. L'occupation des terres (1961-2005) .....	143
Annexe 7. Les potentiels cultivables .....	144
Annexe 8. Les productions alimentaires (1961-2003) .....	145
Annexe 9. La productivité des espaces (1961-2003).....	146
Annexe 10. L'usage des produits alimentaires végétaux (1961-2003).....	147
Annexe 11. Le commerce de produits alimentaires (1961-2003) .....	149
Annexe 12. Comparaison des productions animales observées et simulées (1961-2003).....	150
Annexe 13. Principales hypothèses des simulations Agrimonde (2050).....	152
<b>Tables des figures et tableaux.....</b>	<b>154</b>
<b>Tables des matières .....</b>	<b>156</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>158</b>

## Références bibliographiques

- ADEME, DIREM, Ecobilan *et al.*, 2002. Bilans énergétiques et gaz à effet de serre des filières de production de biocarburants en France. Note de synthèse, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, Paris, Décembre, 19 p.
- AI, 2006. A High Growth Strategy for Ethanol, Report of an Aspen Institute Policy Dialogue, The Aspen Institute, Washington D.C., 86 p.
- Arvalis, 2007. Les Fermarvalis, <http://www.fermarvalis.arvalisinstitutduvegetal.fr/accueil.asp>
- Basset-Mens C., 2005. Propositions pour une adaptation de l'Analyse de Cycle de Vie aux Systèmes de production agricole, Thèse de doctorat, Agrocampus Rennes, INRA, Rennes, 244 p. ([http://www.inra.fr/internet/Departements/EA/fichier\\_these/Basset2005.pdf?PHPSESSID=4f9cfc0262af8b8d9156e724621840eb](http://www.inra.fr/internet/Departements/EA/fichier_these/Basset2005.pdf?PHPSESSID=4f9cfc0262af8b8d9156e724621840eb))
- BCMA, 2004. TRAME. Coût prévisionnel indicatif 2004 des machines agricoles, Bureau de Coordination du Machinisme Agricole, Paris, Juin, 18 p.
- Blottnitz H.v., Curran M.A., 2007. "A review of assessments conducted on bio-ethanol as a transportation fuel from a net energy, greenhouse gas, and environmental life-cycle perspective", Journal of Cleaner Production, 15:7, pp. 607-19
- Bochu J.-L., 2002. PLANETE : Méthode pour l'analyse énergétique de l'exploitation agricole et l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre, Solagro, Toulouse, Octobre, 10 p.
- Bordet J., Michez J.-M., 2006. Mise en oeuvre du plan biocarburant au regard de la protection de la ressource en eau, Rapport CGAAER n° 15, IGE/05/055, Inspection générale de l'environnement, Mai, 81 p.
- Bouwman A.F., Hoek K.W.V.d., Eickhout B. *et al.*, 2005. "Exploring changes in world ruminant production systems", Agricultural Systems, 84, pp. 121-53
- Castellini C., Bastianoni S., Granaï C. *et al.*, 2006. "Sustainability of poultry production using the emergy approach: Comparison of conventional and organic rearing systems", Agriculture, Ecosystems and Environment, 114, pp. 343-50
- CES, 2004. Les débouchés non alimentaires des produits agricoles : un enjeu pour la France et l'Union Européenne, Rapport présenté au nom de la Section de l'Agriculture et de l'Alimentation par Jean-Claude Pasty, Conseil Economique et Social, Paris, 28 avril, 182 p.
- CGGREF, 2006. Gaz à effet de serre. Bioénergies. Agriculture et Forêt : quels enjeux ?, CGGREF infos, Conseil Général du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, 1er trimestre, 12 p.
- Chapagain A.K., Hoekstra A.Y., 2004a. Water Footprints of Nations. Appendices, Research Report 16, UNESCO-IHE, Delft, November, 240 p.
- Chapagain A.K., Hoekstra A.Y., 2004b. Water Footprints of Nations. Main Report, Research Report 16, UNESCO-IHE, Delft, November, 80 p.
- CITEPA, 2005a. Inventaire des émissions de gaz à effet de serre en France au titre de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques, Rapport national d'inventaire, Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique, Paris, Décembre, 362 p.
- CITEPA, 2005b. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques en France. Secten, Rapport d'inventaire national, Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique, Paris, Février, 248 p.
- Collomb P., 1999. Une voie étroite pour la sécurité alimentaire d'ici à 2050, Economica, Paris, 197 p.
- CONCAWE, 2002. Energy and greenhouse gas balance of biofuels for europe - an update, Report 2/02, CONCAWE Ad Hoc Group on Alternative Fuels, Brussels, April, 24 p.
- CONCAWE, 2004. Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context, Well to Wheels Report Version 1b, CONCAWE, EUCAR, JRC, Brussels, January, 60 p.
- Crutzen P.J., Mosier A.R., Smith K.A. *et al.*, 2007. "N<sub>2</sub>O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels", Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 7, 1 August, pp. 11191-205
- Cunningham B., Battersby N., Wehrmeyer W. *et al.*, 2003. "A Sustainability Assessment of a Biolubricant", Journal of Industrial Ecology, 7:3-4, pp. 179-92
- Deaton A., Dreze J., 2009. "Food and Nutrition in India: Facts and Interpretations", Economic & Political Weekly, XLIV:7, February 14, pp. 42-65
- Delgado C., Rosegrant M., Steinfeld H. *et al.*, 1999. Livestock to 2020. The Next Food Revolution, Discussion Paper 28, IFPRI, FAO, ILRI, Whashington D.C., 83 p.

- Delucchi M.A., 2004. Conceptual and Methodological Issues in Lifecycle Analyses of Transportation Fuels, Report UCD-ITS-RR-04-45 prepared for the The U.S. Environmental Protection Agency Office of Transportation and Air Quality, Institute of Transportation Studies, 22 p.
- Devendra C., Sevilla C.C., 2002. Availability and use of feed resources in crop-animal systems in Asia, JAN-FEB, 59-73 p.
- Dorin B., 1999. "Food Policy and Nutritional Security. The Unequal Access to Lipids in India", Economic and Political Weekly, XXXIV:26, June 26 - July 2, pp. 1709-17
- Dorin B., Gitz V., 2008. "Ecobilans de biocarburants : une revue des controverses", Natures Sciences Sociétés, 16:4, Octobre-Décembre, pp. 337-47
- Dorin B., Landy F., 2002. Agriculture et alimentation de l'Inde. Les vertes années (1947-2001), Espaces ruraux, INRA Editions, Paris, 248 p.
- Dormoy C., 2003. 45 indicators of sustainable development: a contribution from Ifen, Etudes et travaux 41, Institut Français de l'Environnement, Paris, 24 p.
- Doublet S., 2006. DIALECTE. Diagnostic Agri-environnemental d'exploitation, Solagro, Toulouse, 6 p.
- Dufey A., 2006. Biofuels production, trade and sustainable development: emerging issues, Sustainable Markets Discussion Paper 2, International Institute for Environment and Development, London, September, 63 p.
- EEA, 2005. Agriculture and environment in EU-15. The IRENA indicator report, European Environmental Agency, Copenhagen, 132 p.
- Elobeid A., Tokgoz S., Hayes D.J. *et al.*, 2006. "The Long-Run Impact of Corn-Based Ethanol on the Grain, Oilseed, and Livestock Sectors: A Preliminary Assessment", CARD Briefing Paper, 06-BP 49, November, pp. 1-16
- Elsayed M.A., Matthews R., Mortimer N.D., 2003. Carbon and Energy Balances for a Range of Biofuels Options, Report Project B/B6/00784/REP, URN 03/386, Sheffield Hallam University, Sheffield, March, 341 p.
- Eshel G., Martin A., 2006. "Diet, Energy, and Global Warming", Earth Interactions, 10:9, pp. 1-17
- EU, 2003. The Lucas survey. European statisticians monitor territory, Working Papers and Studies, European Communities, Luxembourg, June, 26 p.
- FAO, 2003. Food Balance Sheet. A Handbook, Food and Agricultural Organization of the United Nations, <http://www.fao.org/docrep/003/X9892E/X9892E00.HTM>
- FAO, 2006. Faostat. Internet web portal and database as on 30 June 2006, Food and Agricultural Organization of the United Nations, <http://faostat.fao.org/site/395/default.aspx> (30/06/2006)
- FAO, IIASA, 2000. Global Agro-Ecological Zones, Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Institute for Applied Systems Analysis, <http://www.fao.org/AG/agL/agll/gaez/index.htm> (22/06/2007)
- Farrell A.E., Plevin R.J., Turner B.T. *et al.*, 2006. "Ethanol Can Contribute to Energy and Environmental Goals", Science, 311, 27 January, pp. 506-8
- Fernandes S.D., Trautmann N.M., Streets D.G. *et al.*, 2007. "Global biofuel use, 1850–200", Global Biogeochemical Cycles, 21:GB2019, pp. 1-15
- Fischer G., Shah M., Velthuisen H.v. *et al.*, 2001. Global Agro-ecological Assessment for Agriculture in the 21st Century, International Institute for Applied Systems Analysis, Vienna, 44 p.
- Fischer G., Velthuisen H.v., Nachtergaele F.O., 2000. Global Agro-Ecological Zones Assessment: Methodology and Results, Interim Report 00-064, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, November, 338 p.
- Fischer G., Velthuisen H.v., Shah M. *et al.*, 2002. Global Agro-ecological Assessment for Agriculture in the 21st Century: Methodology and Results, Research Report RR-02-02, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, March, 154 p.
- Fischer J., 1999. Energy Inputs in Swiss Agriculture, Working Paper 99-01, Common Agricultural Policy Regional Impact analysis, Bonn, 19 p.
- Fraiture C.d., Giordano M., Yongsong L., 2008. "Biofuels and implications for agricultural water use: blue impacts of green energy", Water Policy, 10:S1, pp. 67-81
- Freibauer A., 2003. "Regionalised inventory of biogenic greenhouse gas emissions from European agriculture", European Journal of Agronomy, 19, pp. 135-60
- Freire F., Malça J., Rozakis S., 2002. Integrated Economic and Environmental Life Cycle Optimization: an Application to Biofuel Production in France, [www.novem.nl/default.asp?menuId=10&documentId=102538](http://www.novem.nl/default.asp?menuId=10&documentId=102538) (10/02/2005)
- Frisch J.-R., Brendow K., Saunders R., 1989. Horizons énergétiques mondiaux : 2000-2020, Editions TECHNIP, 378 p.

- Frischknecht R., Althaus H.-J., Doka G. *et al.*, 2004. Ecoinvent 2000. Overview and Methodology, Final report 1, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Duebendorf, 75 p.
- Galbraith D., Smith P., Mortimer N. *et al.*, 2006. Review of Greenhouse Gas Life Cycle Emissions, Air Pollution Impacts and Economics of Biomass Production and Consumption in Scotland, Environmental Research Report SEERAD Project FF/05/08, Scottish Executive Environment and Rural Affairs, Edinburgh, June 09, 267 p.
- Gitz V., Ciais P., 2004. "Future Expansion Of Agriculture and Pasture Acts to Amplify Atmospheric CO<sub>2</sub> Levels in Response to Fossil-Fuel and Land-Use Change Emissions", Climatic Change, 67:2-3, December, pp. 161-84
- GM, 2002. GM Well-to-Wheel Analysis of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Advanced Fuel/Vehicle Systems. A European Study, Full Background Report, GM, BP, ExxonMobil, TotalFinaElf, Ottobrunn, 27 September, 412 p.
- GMC, ANL, BP *et al.*, 2001. Well-to-Wheel Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Advanced Fuel/Vehicle Systems. North American Analysis, General Motors Corporation, Argonne National Laboratory, BP, ExxonMobil, Shell, June, 47 p.
- Graboski M.S., 2002. Fossil Energy Use in the Manufacture of Corn Ethanol, Report prepared for the National Corn Growers Association, Colorado School of Mines, St. Golden, August, 122 p.
- Griffon M., 2006. Nourrir la planète. Pour une révolution doublement verte, Odile Jacob, Paris, 456 p.
- Hazell P., Pachauri R.K., 2006. Bioenergy and Agriculture: Promises and Challenges, 2020 Focus 14, IFPRI, TERI, Washington D.C., December, 28 p.
- Hecht L., 2007. "Smell of Gigantic Hoax in Government Ethanol Promotion", EIR (Executive Intelligence Review), January, pp. 21-6
- Hill J., Nelson E., Tilman D. *et al.*, 2006. "Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels", PNAS, 103:30, July 25, pp. 11206–10
- IEA, 2004. Biofuels for Transport - An International Perspective, International Energy Agency, Paris, 216 p.
- INRA, CIRAD, 2009. Agrimonde. Agricultures et alimentations du monde en 2050 : scénarios et défis pour un développement durable, Rapport, Institut National de la Recherche Agronomique, Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique, Paris, Février, 194 p.
- IPCC, 1996. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Reference Manual (Volume 3), Intergovernmental Panel on Climate Change, <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6.htm>
- <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/french.htm> (21/08/2003)
- IPCC, 2001a. Climate Change 2001: Mitigation, Cambridge University Press, Cambridge, 752 p.
- IPCC, 2001b. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories, Intergovernmental Panel on Climate Change, [http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/french/gpgaum\\_fr.htm](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/french/gpgaum_fr.htm)
- <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/> (09/09/2004)
- IPCC, 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry, Intergovernmental Panel on Climate Change, [http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/lulucf/gp/lulucf\\_contents.htm](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/lulucf/gp/lulucf_contents.htm) (09/09/2004)
- Jeuland N., Montagne X., Gautrot X., 2004. "Potentiality of Ethanol as a Fuel for Dedicated Engine", Oil & Gas Science and Technology, 59:6, pp. 559-70
- Just R.E., Zilberman D., Hochman E., 1983. "Estimation of Multicrop Production Functions", American Journal of Agricultural Economics, 65:4, pp. 770-80
- Kadam K.L., 2002. "Environmental benefits on a life cycle basis of using bagasse-derived ethanol as a gasoline oxygenate in India", Energy Policy, 30, pp. 371-84
- Kavanagh E., 2006. "Looking at Biofuels and Bioenergy (Letters edited by)", Science, 312, 23 June, pp. 1743-8
- Klimont Z., Brink C., 2004. Modelling of Emissions of Air Pollutants and Greenhouse Gases from Agricultural Sources in Europe, Interim Report 04-048, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, September, 75 p.
- Kojima M., Johnson T., 2005. Potential for Biofuels for Transport in Developing Countries, ESMAP Reports, World Bank, Washington D.C., October, 182 p.
- Lal R., 2004. "Carbon emission from farm operations", Environment International, 30, pp. 981–90
- Lal R., 2005. "World crop residues production and implications of its use as a biofuel", Environment International, 31, pp. 575-84
- Larson E.D., 2005. "Liquid Biofuel Systems for the Transport Sector: a Background Paper", GEF/STRAP Workshop on Liquid Biofuels, New Delhi, 29 August - 01 September, 36 p.
- Macedo I.d.C., 1998. "Greenhouse gas emissions and energy balances in bio-ethanol production and utilization in Brazil (1996)", Biomass and Bioenergy, 14:1, pp. 77-81

- Macedo I.d.C., Leal M.R.L.V., Silva J.E.A.R.d., 2002. Greenhouse Gas (GHG) Emissions in the Production and Use of Ethanol Brazil: Present Situation (2002), NIPE, Campinas, December, 47 p.
- Malassis L., Padilla M., 1986. Economie agro-alimentaire. L'économie mondiale (III), Cujas, Paris, 449 p.
- McCarl B.A., Schneider U.A., 2001. "Greenhouse Gas Mitigation in U.S. Agriculture and Forestry", Science, 294, 21 December, pp. 2481-2
- MEA, 2005. Ecosystems and Human Well-being: Synthesis, Millennium Ecosystem Assessment, World Resources Institute, Washington D.C., 155 p.
- Meul M., Nevens F., Reheul D. *et al.*, 2007. "Energy use efficiency of specialised dairy, arable and pig farms in Flanders", Agriculture, Ecosystems and Environment, 119, pp. 135-44
- Mishra S., 2007. A Brief History of Production Functions, MPRA Paper 5254, North-Eastern Hill University, Shillong (India), 09 October, 23 p.
- Mishra S.N., Dikshit A.K., 2004. Environment and Livestock in India. With a Comparative Study of The Indian and US Dairy System, Manohar, New Delhi, 196 p.
- Ogino A., Orito H., Shimada K. *et al.*, 2007. "Evaluating environmental impacts of the Japanese beef cow-calf system by the life cycle assessment method", Animal Science Journal, 78, pp. 424-32
- Oliveira M.E.D.D., Vaughan B.E., Rykiel E.J., 2005. "Ethanol as Fuel: Energy, Carbon Dioxide Balances, and Ecological Footprint", BioScience, 55:7, July, pp. 593-602
- Parmentier B., 2007. Nourrir l'humanité. Les grands problèmes de l'agriculture mondiale au XXIe siècle, La Découverte, Paris, 275 p.
- Pimentel D., 2001. "Biomass Utilization, Limits of", in Encyclopedia of Physical Science and Technology, Academic Press, pp. 13 p.
- Pimentel D., Patzek T., 2007. "Ethanol Production: Energy and Economic Issues Related to U.S. and Brazilian Sugarcane", Natural Resources Research, 16:3, September, pp. 235-42
- Pimentel D., Patzek T.W., 2005. "Ethanol Production Using Corn, Switchgrass, and Wood; Biodiesel Production Using Soybean and Sunflower", Natural Resources Research, 14:1, March, pp. 65-76
- Ponsioen T.C., Laborte A.G., Roetter R.P. *et al.*, 2003. TechnoGIN-3: a technical coefficient generator for cropping systems in East and Southeast Asia, Quantitative Approaches in Systems Analysis 26, PE&RC, Wageningen, December, 72 p.
- Pretty J.N., Ball A.S., Lang T. *et al.*, 2005. "Farm costs and food miles: An assessment of the full cost of the UK weekly food basket", Food Policy, 30, pp. 1-19
- Punter G., Rickeard D., Larivé J.-F. *et al.*, 2004. Well-to-Wheel Evaluation for Production of Ethanol from Wheat, Report FWG-P-04-024, Low Carbon Vehicle Partnership, October, 40 p.
- Rainelli P., 2007. L'avenir des biocarburants et incidences sur l'équilibre des marchés agricoles, Policy Paper 25, Notre Europe, Paris, Mars, 32 p.
- Richards I.R., 2000. Energy balances in the growth of oilseed rape for biodiesel and of wheat for bioethanol, Levington Agriculture Report, British Association for Bio Fuels and Oils, Suffolk, June, 38 p.
- Righelato R., Spracklen D.V., 2007. "Carbon Mitigation by Biofuels or by Saving and Restoring Forests?", Science, 317:907, 17 August, pp. 902
- Roberts M.G., Male T.D., Toombs T.P., 2007. Potential Impacts of Biofuels Expansion on Natural Resources. A Case Study of the Ogallala Aquifer Region, Environmental Defence, New York, 18 p.
- Roux P., Patingre J.-F., Giroux F. *et al.*, 2005. "Ecotechnologies et écoconception : concepts et mise en oeuvre", Ingénieries, 42, Juin, pp. 55-70
- Rozakis S., Sourie J.-C., 2005. "Micro-economic modelling of biofuel system in France to determine tax exemption policy under uncertainty", Energy Policy, 33, pp. 171-82
- Sadones P., 2006. Les agrocarburants, Rapport EDEN 2006, Energie Durable en Normandie, Yvetot, 10 p.
- SCESS, 2004. Enquête sur les pratiques culturelles en 2001, Agreste Chiffres et Données Agriculture 159, Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche et des Affaires Rurales, Service Central des Enquêtes et Etudes Statistiques, Paris, Juin, 320 p.
- Schmidhuber J., 2007. Biofuels: An emerging threat to Europe's Food Security?, Policy Paper, Notre Europe, Paris, May, 40 p.
- Sebillote M. (Dir.), 2001. Les protéines végétales et animales : enjeux de société et défis pour l'agriculture et la recherche, Institut National de la Recherche Agronomique, Paris, 195 p.
- Shapouri H., 2002. The Energy Balance of Corn Ethanol: An Update, United States Department of Agriculture, Washington D.C., July, 19 p.
- Shapouri H., 2004. The 2001 Net Energy Balance of Corn-Ethanol (Preliminary), <http://www.bioproducts-bioenergy.gov/pdfs/net%20energy%20balance.pdf> (02/11/2004)
- Sims R.E.H., Hastings A., Schlamadinger B. *et al.*, 2006. "Energy crops: current status and future prospects", Global Change Biology, 12, pp. 1-23

- Slinsky S.P., Tiller K.H., 1999. Application of an Alternative Methodological Approach for Budget Generators for Research, <http://apacweb.ag.utk.edu/ppap/pdf/99/saeaabs.pdf> (01/04/2005)
- Smeets E.M.W., Faaij A.P.C., Lewandowski I.M. *et al.*, 2007. "A bottom-up assessment and review of global bio-energy potentials to 2050", Progress in Energy and Combustion Science, 33, pp. 56-106
- Smil V., 2000. Feeding the World. A Challenge for the Twenty-First Century, MIT Press, Cambridge, 360 p.
- Smith P., Martino D., Cai Z. *et al.*, 2007. "Policy and technological constraints to implementation of greenhouse gas mitigation options in agriculture", Agriculture, Ecosystems and Environment, 118, pp. 6-28
- Sourie J.C., Rozakis S., 2001. "Bio-fuel production system in France: an Economic Analysis", Biomass and Bioenergy, 20, pp. 483– 9
- Sourie J.C., Tréguer D., 2005. "Le développement des biocarburants dans les exploitations agricoles en France", Séminaire "Quel perspectives pour le développement des cultures bioénergétiques ?", IFRI, Paris, 29/03/2005, 32 p.
- Sourie J.C., Tréguer D., Rozakis S., 2005. "L'ambivalence des filières biocarburants", INRA Sciences Sociales, 20:2, Décembre, pp. 1-8
- Steinfeld H., Gerber P., Wassenaar T. *et al.*, 2006. Livestock's long shadow environmental issues and options, Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, 407 p.
- Stern N., 2006. Stern Review on the economics of climate change, HM Treasury, Cabinet Office, London, 30 October, 671 p.
- Tilman D., Hill J., Lehman C., 2006. "Carbon-Negative Biofuels from Low-Input High-Diversity Grassland Biomass", Science, 314, 8 December, pp. 1598-600
- Tréguer D. (Dir.), 2007. L'avenir à moyen terme des biocarburants : enjeux politiques, économiques, environnementaux et technologiques, Déméter 2008, Club Déméter, Paris, 97-302 p.
- USDA, 2006. USDA National Nutrient Database for Standard Reference. Release 19, U.S. Department of Agriculture, <http://www.nal.usda.gov/fnic/foodcomp/search/> (20/08/2007)
- Vilain L. (Dir.), 2000. La méthode IDEA. Indicateurs de durabilité des exploitations agricoles. Guide d'utilisation, Educagri éditions, Dijon
- WADE, 2004. Bagasse Cogeneration. Global Review and Potential, Report, World Alliance for Decentralized Energy, June, 72 p.
- Wang M., 2005. "Updated Energy and Greenhouse Gas Emission Results of Fuel Ethanol", The 15th International Symposium on Alcohol Fuels, San Diego, 26-28 September, 24 p.
- Wirsenius S., 2003. "Efficiencies and biomass appropriation of food commodities on global and regional levels", Agricultural Systems, 77, pp. 219–55
- Woods J., Bauen A., 2003. Technology Status Review and Carbon Abatement Potential of Renewable Transport Fuels in the UK, Report B/U2/00785/REP, URN 03/982, Department of Trade and Industry, London, 138 p.
- WWI, 2006. Biofuels for transportation. Global potential and implications for sustainable agriculture and energy in the 21st century. Extended summary, Worldwatch Institute, Washington D.C., June, 38 p.
- Zah R., Böni H., Gauch M. *et al.*, 2007. Ökobilanz von Energieprodukten, Ökologische Bewertung von Biotreibstoffen, Schlussbericht, Empa, St. Gallen, Mai, 206 p.