



**Conseil Français de l'Énergie**

Comité Membre du Conseil Mondial de l'Énergie  
French Member Committee of the World Energy Council

**R&D et investissement dans les technologies  
environnementales en présence  
d'incertitudes technologique et politique**

**Université Strasbourg - BETA**

**Rapport final - Contrat 64**

**2011**

**R&D et investissement dans les technologies  
environnementales en présence d'incertitudes  
technologique et politique**

Arman AVADIKYAN\* et Olivier DUPOUET\*\*

Sous la direction de Jean-Alain HERAUD\*

\*Bureau d'Economie Théorique et Appliquée (Université de Strasbourg, UMR-CNRS 7752)

\*\*BEM Management School (Bordeaux)

**Rapport Final**

réalisé dans le cadre du contrat de recherche

entre le CFE et l'Université de Strasbourg

Décembre 2011

## Sommaire

<b>Introduction .....</b>	<b>3</b>
<b>Partie I .....</b>	<b>6</b>
<b>Politiques environnementales, innovation endogène et incertitudes : une revue de la littérature</b>	
1. Les instruments de politiques environnementales et R&D.....	10
A. R&D et incertitude sur les coûts d'abattement : prix <i>versus</i> quantité.....	11
B. Politiques environnementales et propriétés du marché de l'innovation .....	13
C. Temporalité et incertitude des politiques environnementales .....	19
2. Politiques environnementales et allocation des efforts de R&D entre plusieurs technologies .....	24
A. Arbitrages entre politique environnementale et politique technologique .....	24
B. Allocation des efforts de R&D et incertitudes environnementales / politiques.....	27
C. Allocation des efforts de R&D et incertitude technologique .....	30
D. Choix entre projets de R&D risqués et non risqués.....	34
E. Instruments politiques et choix technologiques .....	36
3. L'hypothèse de Porter : innovation environnementale et les déterminants internes aux firmes....	40
A. L'hypothèse de Porter, ses critiques et fondements théoriques.....	40
B. Incertitudes technologiques / politiques .....	42
C. Impact des politiques environnementales sur le comportement des décideurs.....	44
D. Réglementation environnementale et problèmes d'agence .....	46
E. Gestion de la contrainte environnementale : les aspects organisationnels et cognitifs .....	49
<b>Conclusion de la Partie I .....</b>	<b>53</b>

<b>Partie II .....</b>	<b>57</b>
<b>Gestion de projets de R&amp;D optionnels en présence d'incertitude endogène</b>	
1. Théorie des options, R&D et arbitrage entre exploration-exploitation .....	59
A. La théorie des options réelles et activités de R&D .....	59
B. Portefeuille d'options et recherches par exploration - exploitation.....	62
C. Chaîne d'options et agencement des critères de décision.....	66
2. Modèle de simulation de projets de R&D optionnels avec incertitudes technologique et politique : une application au cas des technologies de l'énergie .....	73
A. Démarche générale .....	73
B. L'environnement .....	74
C. L'organisation de la R&D : apprentissage et décision .....	77
D. Résultats.....	85
<b>Conclusion de la Partie II .....</b>	<b>103</b>
<b>Références .....</b>	<b>106</b>

## Introduction

Le présent rapport examine les impacts des politiques environnementales sur les activités de R&D des entreprises en présence d'une ou plusieurs sources d'incertitudes relatives au processus d'innovation, aux décisions politiques et aux conséquences environnementales des activités industrielles (pollution ou gaz à effet de serre). Il vise à la fois à présenter une revue étendue de la littérature dans ce domaine et à développer une contribution originale basée sur un modèle de simulation appliquée au secteur de l'énergie. En adoptant un raisonnement en termes d'option réelles, notre contribution a pour objet de préciser en quoi les différences de comportements et d'agencement des critères décisionnels de la part des firmes pour structurer la coordination de leurs activités de recherche au sein de leur portefeuille de projets peuvent générer des trajectoires d'apprentissage différenciés face aux incertitudes à la fois technologiques et aux incertitudes sur les politiques environnementales. L'hypothèse qui sous-tend notre modèle est que face aux incertitudes qui caractérisent les défis technologiques et politiques posés par le changement climatique, les entreprises dont les activités sont intensives en émission de carbone sont amenées à gérer et à planifier de manière dynamique leurs activités et leur portefeuille de R&D. Dans ce contexte, l'organisation et les critères qui structurent le processus et le portefeuille de R&D peuvent avoir un impact important sur la performance des firmes dans la mesure où ils orientent de manière critique l'accumulation des connaissances sur les différentes technologies et la résolution des incertitudes auxquelles elles sont confrontées.

La *première partie* de notre rapport passe en revue un ensemble de travaux issus de la littérature sur le changement technique consacrés à l'analyse des décisions de R&D dans le domaine des technologies de l'énergie et de l'environnement. Plusieurs courants de la littérature économique sont mobilisés à cet effet. Le premier s'inscrit dans une perspective d'organisation industrielle et utilise les concepts de la théorie des jeux pour analyser les comportements stratégiques à l'équilibre. Un second courant se rattache aux théories de la croissance endogène. Enfin un troisième courant relève des théories de la firme.

L'étude d'un point de vue économique de l'influence du comportement des firmes sur l'innovation technologique et l'accumulation des connaissances s'est essentiellement focalisée sur les propriétés de bien public non rival et non exclusif de la connaissance issue des activités de R&D. Les modèles d'organisation industrielle et de croissance endogène qui se focalisent sur les politiques environnementales afin d'orienter le comportement de R&D des firmes vers le développement de technologies moins intensives en émission ont ainsi contribué à mieux expliciter les conséquences et les coûts de telles politiques en prenant en compte les imperfections de marché de la connaissance *via* les différences entre le rendement social et le rendement privé des activités de recherche (les externalités) et les coûts d'opportunité de la R&D environnementale (les effets d'éviction). Plus récemment ces deux courants de littérature ont par ailleurs suggéré que la façon dont le progrès technologique est modélisé peut avoir des implications cruciales sur les choix technologiques, les coûts et la temporalité des politiques climatiques. Certaines contributions récentes appartenant au même

courant de recherche ont également pris plus précisément en considération l'impact des incertitudes sur les conséquences du changement climatique, sur les technologies et les politiques d'abattement des émissions sur les décisions de R&D des acteurs publics et des firmes<sup>1</sup>. Enfin les contributions inspirées des différentes théories de la firme ont mis en avant l'importance des facteurs internes aux entreprises pour mieux expliciter leurs comportements différenciés face aux politiques environnementales

Sans prétendre à l'exhaustivité, notre revue de la littérature traite principalement des contributions prenant explicitement en compte l'impact des incertitudes technologiques et/ou politiques sur les décisions de R&D. Nous présentons dans un premier temps un certain nombre de contributions qui comparent différents instruments de politique environnementale suivant leur effet incitatif sur le niveau de R&D des firmes en présence d'incertitude. Un second volet traite des travaux qui analysent l'impact des politiques environnementales sur la direction et les trajectoires de R&D en supposant plusieurs filières technologiques. Enfin le troisième volet de notre revue la littérature est consacrée à l'hypothèse de Porter portant sur le lien entre politique environnementale, innovation et profitabilité des entreprises. A travers l'hypothèse de Porter nous insistons sur un certain nombre de facteurs comportemental, managérial et organisationnel internes aux firmes susceptibles d'impacter les décisions d'innovation environnementale.

La *deuxième partie* détaille notre approche conceptuelle basée sur le raisonnement en termes d'options réelles et présente notre modèle de simulation. La théorie des options réelles qui vise à expliciter les fondements économiques de la stratégie managériale constitue une approche permettant d'étudier les comportements d'investissement des firmes en présence d'incertitude et d'irréversibilité. Une des particularités de cette théorie est de considérer les implications de la nature séquentielle des processus de décisions sur les stratégies d'investissement des entreprises. La possibilité d'envisager les investissements comme des options à travers les opportunités potentielles qu'ils sont susceptibles de générer (en termes notamment de flexibilité lorsqu'il s'agit par exemple d'un portefeuille de R&D de projets optionnels) permet de donner une vision plus nuancée des choix d'investissement que les approches d'évaluation traditionnelles s'appuyant par exemple sur le critère de la valeur actualisée nette. En effet, la logique d'option montre que dans un environnement incertain, la prise en compte de la valeur d'option peut impliquer des décisions de sur-investissement ou de sous-investissement indépendamment des considérations relatives aux imperfections de marché.

Parmi les extensions des modèles d'options réelles, les travaux adoptant comme unité d'analyse les ressources et les capacités dynamiques des firmes ont plus particulièrement insisté sur les mécanismes et les stratégies d'apprentissage fondés sur le raisonnement en termes d'options réelles dans un contexte organisationnel (Bowman et Hurry, 1993; Kogut et

---

<sup>1</sup> Confer notamment le supplément de la revue *Energie Economics* (Vol. 31, 2009) consacré à la thématique "Changement technique et incertitude en économie environnementale" et les contributions respectives de Requate (2005) et de Baket et Shittu (2008) pour des revues de la littérature relatives d'une part aux modèles d'organisation industrielle et d'autre part aux modèle de croissance endogène.

Kulatilaka, 2001; McGrath *et al.*, 2004). Dans ce cadre, une des orientations a été d'essayer de mieux expliciter les comportements d'investissements optionnels ou exploratoires lorsque la résolution de l'incertitude est endogène c'est à dire dépend des actions des firmes (Childs et Triantis, 1999; Bernardo et Chowdyry, 2002, Vassolo *et al.*, 2004; McGrath et Nerkar, 2004). Ces modèles insistent notamment sur le fait que les stratégies de R&D des firmes ne dépendent pas seulement des résultats observés sur les différents projets mais aussi du potentiel d'apprentissage offert par ces projets. La nature endogène du processus d'apprentissage permet ainsi de mettre en évidence le rôle des dépendances de trajectoires et de relever les différences de positionnement des firmes en termes de ressources et de connaissances. L'importance des facteurs organisationnels ainsi que cognitifs pour rendre compte de la performance des firmes en présence d'incertitude endogène ont également conduit à insister sur les possibilités de biais décisionnels et les arbitrages qui jalonnent le processus d'allocation des ressources de R&D entre activités d'exploration et activités d'exploitation (March, 1991; March et Levinthal, 1993) en présence de portefeuilles de projets optionnels (Adner et Levinthal, 2004; Miller et Arikan, 2004; Barnett, 2005 et 2008).

En s'inscrivant dans la lignée des travaux qui s'intéressent aux implications organisationnelles et cognitives du raisonnement en termes d'options, notre travail de modélisation vise à expliciter un certain nombre de critères clés de décisions d'options qui sont susceptible d'affecter de manière critique l'apprentissage, l'ajustement et la performance du portefeuille de R&D des firmes. Ce travail représente les décisions d'options et l'apprentissage qui en résulte au travers du processus de coordination (dépendant des critères décisionnels structurant le processus de R&D) entre la recherche par exploration et la recherche par exploitation. Plus précisément, notre modèle de simulation considère une firme qui, face à la fois à des incertitudes technologiques (endogènes) et une incertitude sur la politique climatique (exogène) représentée par l'évolution stochastique du prix du carbone doit gérer un portefeuille de R&D composées de différentes technologies (carbonées et non carbonées) pour prendre une décision d'investissement afin de produire de l'électricité. Les résultats comparent les performances de la firme en fonction de différents agencements de critères de décisions structurant la coordination entre la recherche par exploration et la recherche par exploitation du portefeuille technologique.

## **Partie I**

### **Politiques environnementales, innovation endogène et incertitudes : une revue de la littérature**

Dans une perspective théorique il est commun de distinguer entre l'adoption de technologies existantes mais nouvelles pour la firme d'une part et la R&D de nouvelles technologies d'autre part. Traditionnellement, les politiques environnementales ont été appréhendées dans la littérature économique par rapport à leur efficacité d'un point de vue économique et social à inciter les entreprises à internaliser les externalités environnementales et à influencer l'adoption et la diffusion de nouvelles technologies moins émettrices (voir Requate (2005) pour une présentation détaillée de la littérature sur l'adoption).

Notre revue de la littérature théorique porte sur les modèles économiques qui étudient l'impact des politiques environnementales sur les activités d'innovation et les investissements en R&D des entreprises. Ces travaux s'inscrivent dans une perspective dynamique et soulignent l'importance que revêtent les politiques environnementales non seulement dans le processus d'adoption et de diffusion des nouvelles technologies environnementales mais dans le processus même d'innovation à travers leur impact incitatif sur l'effort de R&D des entreprises. Cette approche conduit à concevoir les politiques environnementales dans un double objectif qui est d'inciter les entreprises d'une part à réduire les émissions liées à leur activité de production et d'autre part à engager des investissements de R&D pour réduire les coûts d'abattement de leurs émissions ou développer des technologies sans émissions.

Cette perspective se différencie d'une part des modèles, qui en supposant les technologies comme données et immuables, soit se focalisent sur l'impact des instruments politiques sur l'arbitrage optimal entre les niveaux de production et de réduction des externalités négatives des entreprises, soit sur les décisions d'adoption entre différentes technologies existantes plus ou moins émettrices. Ils se distinguent également des modèles où le progrès technologique est supposée exogène dans la mesure où le changement technique est induit de manière endogène *via* l'impact des politiques sur les efforts d'innovation des entreprises.

Elle implique également de revoir les dynamiques de coordination et d'interaction entre les politiques environnementales et les politiques technologiques (Fischer et Newell, 2008). En effet, à partir du moment où l'on admet que les politiques environnementales peuvent avoir un effet (quoi que de manière indirecte) sur l'innovation technologique au delà des politiques technologiques (qui elles, impactent directement les décisions de R&D et les choix technologiques) il devient plus difficile d'admettre comme cela est fait de manière traditionnelle que chacune de ces politiques agit sur les décisions des firmes de manière indépendante : (1) la correction des défaillances sur le marché de la R&D, provoquées par la nature de bien public des connaissances, étant l'apanage des politiques d'innovation pour compenser la différence entre les rendements privé et social des investissements en R&D; (2) la correction des défaillances sur le marché des biens environnementaux relevant des prérogatives de la politique environnementale pour internaliser ou réduire le coût social des externalités négatives (des émissions).

Tous les modèles considérés par la suite adoptent comme variable de décision principale la R&D. Le décideur est soit une firme (ou un ensemble de firmes), soit un planificateur central qui agit pour le bien être social. Du point de vue du décideur public, les décisions portent soit sur le choix entre différentes configurations de politiques environnementales (instruments, temporalité, degré de stabilité), soit sur l'articulation entre les décisions de politique environnementale et de politique technologique.

L'incitation à l'innovation se réfère au bénéfice qu'une firme génère en développant une nouvelle technologie. En fonction de la réglementation, un innovateur potentiel décide de son investissement en R&D. Un niveau plus élevé d'investissement peut soit conduire à une innovation plus importante (un changement plus radical à la fois des courbes de coût d'abattement et du coût marginal d'abattement) ou induire une probabilité plus élevée d'innovation ou un succès plus rapide. Un innovateur qui maximise ses profits choisit un niveau de R&D égalisant son bénéfice marginal espéré à son coût marginal espéré. Les firmes qui s'engagent dans la R&D appartiennent soit elles-mêmes au secteur polluant, soit s'engagent dans cette activité exclusivement pour vendre ou licencier leur nouvelle technologie au secteur polluant. Dans le premier cas le bénéfice de l'innovateur est déterminé par le changement de ses coûts de conformité à la réglementation (incluant la baisse du coût d'abattement, la vente de permis, la baisse des dépenses liées aux taxes versées et aux permis achetés) et le changement de son profit lié à son activité de production. Par ailleurs, le bénéfice de l'innovateur peut augmenter à travers les revenus de licences mais peut aussi être négativement affecté par d'autres firmes qui imitent l'innovation. Si l'objectif de l'innovateur est principalement de commercialiser sa technologie, son profit dépend de la volonté des firmes polluantes à payer pour la nouvelle technologie qui elle-même dépend des coûts d'adoption, des coûts de conformité à la réglementation, et par les profits qu'elles réalisent avec la nouvelle technologie.

Au vu de l'étendue de la littérature existante, notre travail se concentre principalement sur les travaux prenant explicitement en compte dans leur analyse le rôle des incertitudes et ses implications en termes de politiques environnementales et technologiques. Ces sources d'incertitudes portent suivant les travaux sur :

- *La technologie* : date d'arrivée de l'innovation ou du changement technique suite à l'effort de R&D, résultat et/ou efficacité du processus de R&D (ampleur de l'innovation ou possibilité de succès ou d'échec), l'impact de l'investissement en R&D sur la probabilité d'innovation;
- *L'impact environnemental de la production* : les dommages occasionnés par les pollutions ou changement climatique ;
- *La politique* : la sévérité des politiques environnementales (taxe, contraintes sur les émissions, standard de performance, niveau d'abattement ou accumulation à long terme des émissions) et la temporalité /prévisibilité des décisions politiques.

Certains travaux considèrent un processus d'innovation déterministe et analysent l'impact des autres incertitudes sur les décisions de R&D. D'autres travaux tiennent compte de l'incertitude technologique et examinent les implications sur les décisions des agents en présence ou non d'autres sources d'incertitudes (marché, dommages climatiques, politique). Plus particulièrement, les travaux intégrant plusieurs sources d'incertitudes mettent en avant l'importance des effets de leurs interactions sur les décisions des agents. Par ailleurs, certaines contributions différencient plusieurs profils d'incertitudes (d'amplification des risques) pour

une source d'incertitude donnée. Remarquons que tous les travaux considérés œuvrent, au sens de Knight, dans un contexte de risque et non pas d'incertitude qui n'est pas probabilisable, mesurable et donc assurable de manière objective. L'incertitude au sens de Knight suppose que le processus subjectif d'évaluation des choix et de construction des probabilités pour réduire ou résoudre l'incertitude relèvent d'un processus d'apprentissage spécifique aux acteurs et à leur contexte organisationnel/institutionnel (rationalité procédurale) indépendamment des aléas "objectivables".

Une différence importante entre ces travaux porte également sur la distinction entre incertitude exogène et incertitude endogène. Certains modèles considèrent une *incertitude technologique exogène* et étudient son impact sur les décisions de R&D. L'*apprentissage* reste dans ce contexte *passif* au sens où il est assimilé à un mécanisme de révélation d'information dans le temps indépendamment des actions des agents. D'autres travaux adoptent une approche où la résolution de l'*incertitude technologique* se fait de manière *endogène* avec un processus d'*apprentissage* de type *actif*. Dans ces modèles le niveau des activités de R&D affecte la distribution des probabilités entre les différents résultats possibles ou alors réduit l'incertitude quant au potentiel des technologies. En revanche, les incertitudes sur les dommages et la politique climatique sont supposées exogènes et sont résolues avec simplement le passage du temps dans le cadre de modèles multi-périodes.

- **Les questions abordées**

Tous les modèles explicitent l'impact des politiques environnementales et technologiques sur les décisions de R&D des décideurs économiques :

- *Comment la possibilité de R&D et les incertitudes qui lui sont associées affectent-elles le choix entre différents instruments de politiques environnementales ?*

Ces contributions comparent différents instruments de politiques environnementales (taxe, permis d'émission, standard de performance ou technologique) et technologiques (subvention) suivant leur effet incitatif sur l'effort de R&D des entreprises en présence d'incertitude sur le processus d'innovation et suivant leur efficacité en termes de bien être social.

- *Quelles sont les articulations entre la politique technologique et la politique environnementale en présence d'incertitude ?*

Ces travaux examinent la façon dont l'incertitude (sur le changement technique mais aussi les dommages) affecte l'articulation entre la *politique environnementale* (abattement des émissions ou mise en place d'un instrument de politique environnementale) et la *politique d'innovation* (soutien apporté aux activités de R&D).

- *Comment les incertitudes affectent-elles le portefeuille ou les choix d'investissement technologique ?*

Un certain nombre de modèles étudient l'impact des politiques environnementales sur l'allocation des efforts de R&D en présence de plusieurs filières technologiques et les stratégies de diversification des firmes.

*- Comment en présence d'incertitude, l'organisation interne de la firme et le comportement des managers influencent-ils leur effort d'innovation face à une politique environnementale?*

Contrairement aux travaux qui considèrent la firme comme une boîte noire et supposent les décideurs comme étant dotés d'une rationalité parfaite, ces contributions qui s'inspirent de l'hypothèse de Porter prennent plus explicitement en compte d'une part les aspects comportementaux (comportement face au risque, biais pour le présent, rationalité limitée) et organisationnels et les conflits d'intérêts au sein des firmes pour étudier l'impact des politiques environnementales sur les décisions de R&D et de choix technologiques.

Notre présentation de la littérature est structurée en trois temps. Dans le **Chapitre 1** nous abordons les travaux qui comparent différents instruments de politiques environnementales suivant leur impact sur le niveau d'investissement en R&D des entreprises. Le **Chapitre 2** est consacré aux travaux qui considèrent les politiques environnementales en présence de plusieurs filières (portefeuille) technologiques. Enfin, le **Chapitre 3** est dédié à l'hypothèse de Porter et à la façon dont les aspects organisationnels et managériaux affectent la réponse en termes de R&D des firmes aux politiques environnementales.

## 1. Les instruments de politiques environnementales et R&D

Un des objectifs des instruments de politiques environnementales est de minimiser les coûts de transition vers une économie qui internalise mieux les externalités environnementales. Les approches économiques dans le domaine de la réglementation environnementale ont dans cette perspective effectuée une distinction entre deux types d'instruments : les instruments de marché et les instruments hors marché appelés « commande et contrôle ». Les premiers incitent à réduire les émissions à travers le prix en donnant la possibilité aux firmes de décider librement de la quantité d'émission qu'elles souhaitent réduire ou abattre. Parmi les instruments de marché on trouve principalement les taxes et les permis d'émission. Dans le cas d'une taxe, le prix des émissions est administré par le décideur public, chaque firme devant payer le même prix marginal pour chaque unité de pollution émise. Dans le cas des permis une firme est amenée à détenir un permis pour chaque unité de pollution qu'elle désire émettre et les permis peuvent être échangés entre les firmes. Par ailleurs deux mécanismes d'allocation de permis sont généralement distingués : une allocation initiale gratuite et une allocation par mise aux enchères des permis. A la différence de la taxe, le prix de marché des permis est déterminé de manière endogène par le mécanisme de marché. Quant aux instruments de « contrôle-commande » ils incluent principalement les standards technologiques (prescrivant par exemple directement aux firmes l'adoption de la meilleure technologie disponible) et les standards d'émission (seuil maximal d'émission).

L'évaluation des instruments de politiques environnementales s'est basée principalement sur le critère *d'efficacité statique en termes de coût*. Dans cette perspective, à condition que les externalités environnementales ne soient pas dominées par d'autres externalités, d'autres imperfections de marché, des asymétries informationnelles ou incertitudes, les économistes tendent à admettre généralement la supériorité des mécanismes incitatifs fondés sur les prix sur ceux de la réglementation par « commande-contrôle ». En effet, l'efficacité économique d'un instrument est évaluée en fonction de sa capacité à établir un prix pour atteindre un objectif environnemental fixé au moindre coût. En présence de conditions concurrentielles, contrairement aux instruments de « contrôle commande », les instruments de marché satisfont ce critère dans la mesure où ils conduisent à l'égalisation des coûts marginaux d'abattement entre les firmes à travers la mise en place en premier des solutions technologiques les moins onéreuses. Par ailleurs toujours lorsque les marchés sont concurrentiels et en l'absence d'incertitude, l'instrument prix (taxe) et l'instrument quantité (permis d'émission) s'avèrent équivalents en termes d'efficacité statiques.

Cependant comme l'ont souligné outre l'efficacité statique, la façon dont les instruments politiques motivent le développement de nouvelles technologies environnementales constitue un des critères clés à l'aune desquels doit aussi être jugé la performance des instruments de politique environnementale. Cette perspective met en avant l'importance des incitations à long terme fournies par les instruments politiques au-delà de leur impact sur les incitations à l'abattement et à l'adoption des technologies existantes. La possibilité d'innovation induite permet tout d'abord d'étudier la façon dont elle affecte le choix entre les différents instruments. Elle requiert également de revoir la façon dont elle influence la sévérité de la réglementation environnementale. Elle questionne la façon dont les politiques environnementales doivent être complétées par des politiques supplémentaires pour promouvoir l'innovation tels que les subventions ou la mise en concurrence technologique. Magat (1979) a été un des premiers à comparer l'effet des taxes, des permis, des standards d'émission et des standards technologiques sur l'innovation en supposant un processus de R&D déterministe. L'auteur a montré que tous les instruments mis à part les standards

technologiques ont un impact incitatif sur l'innovation pour réduire les émissions. En effet, dans le cas du standard technologique celui-ci incite au mieux les firmes à adopter la meilleure technologie existante dans la mesure où les firmes une fois qu'elles ont adopté celle-ci pur être en conformité avec la réglementation n'ont plus d'incitation à innover pour améliorer leur technologie. Il est par ailleurs montré que si les taxes et les permis sont conçu de telle manière à ce que les deux instruments conduisent au même niveau de réduction des émissions à long terme qu'un standard d'émission alors les trois instruments fournissent la même incitation à l'innovation.

Lorsque l'on prend en compte cependant les propriétés dynamiques de l'innovation, les résultats des comparaisons entre les différents instruments peuvent devenir plus complexes dans la mesure où au-delà des externalités environnementales, les décisions politiques doivent composer avec les incertitudes liées au processus de R&D, avec les caractéristiques et les distorsions du marché de l'innovation (par exemple les externalités liées aux connaissances produites, pouvoir de marché de l'innovateur) et avec les incertitudes véhiculés par les différents instruments et le processus même de décision politique. Un des premiers auteurs à s'être intéressé aux différents instruments en termes de leur impact incitatif sur la R&D est

Dans ce qui suit nous allons brièvement présenter un certain nombre de résultats relatifs à la comparaison des différents instruments et à leur effet incitatif pour soutenir l'effort d'innovation environnementale en nous focalisant surtout sur les caractéristiques qui influent sur les activités de R&D et qui peuvent impacter l'efficacité des différents instruments mis en place par le décideur public.

La **Section A** se focalise sur la capacité des différents instruments à composer avec les incertitudes. Ces incertitudes peuvent porter sur les coûts et les bénéfices d'abattement, le processus de R&D et le marché des permis d'émission. La **Section B** concerne l'impact des caractéristiques du marché de l'innovation (externalités de connaissance, pouvoir de marché de l'innovateur) sur l'efficacité relative des différents instruments et leur sévérité en présence d'incertitude technologique. Enfin, la **Section C** considère la temporalité des décisions politiques et l'impact de l'incertitude politique sur les décisions de R&D des firmes.

## **A. R&D et incertitude sur les coûts d'abattement : prix *versus* quantité**

En économie environnementale, une orientation théorique importante a consisté à mieux comprendre les principes devant gouverner le choix socialement optimal des instruments politiques en présence d'incertitude sur les coûts et les bénéfices d'abattement. Ces travaux examinent surtout la capacité des différents instruments à s'adapter aux incertitudes mentionnées.

Dans son article pionnier, **Weitzman (1974)** a montré que l'incertitude sur les coûts d'abattement intervient de manière critique dans l'avantage comparatif de la **réglementation par les quantités (standard, quotas ou permis d'émission échangeables)** et par les **prix (taxe)**. En l'absence d'incertitude, dans la mesure où le planificateur social est capable d'anticiper parfaitement le niveau d'abattement choisi par les firmes, les deux instruments sont équivalents. En présence d'incertitude (lorsque la réaction des producteurs ne peut être anticipée), avec l'instrument prix, c'est la quantité d'abattement choisie par la firme qui n'est plus contrôlable par le décideur public, tandis que si la régulation se fait par les quantités la perte de contrôle porte sur le coût d'abattement de la firme.

Dans ce cadre le choix optimal entre les des deux instruments d'un point de vue social dépend des pentes relatives des courbes de coûts et de bénéfices marginaux de l'abattement. Si la pente des bénéfices marginaux est relativement plus importante que la pente des coûts marginaux cela signifie des dommages pouvant être significatifs au delà d'un seuil critique d'émission. Weitzman montre alors qu'il est préférable pour le planificateur social d'utiliser l'instrument quantité pour contrôler les émissions, afin d'éviter un risque de dommage environnemental important. Dans le cas inverse où la pente des bénéfices marginaux est relativement plus faible que la pente des coûts marginaux, il s'avère préférable d'utiliser l'instrument prix. La raison est que si le régulateur choisit un standard trop sévère en raison de l'incertitude sur les coûts, il impose des coûts excessifs aux firmes (et à la société), alors qu'à travers l'instrument prix, les firmes ont toujours la possibilité de verser la taxe sur les émissions au lieu de les réduire. Autrement dit, la flexibilité que confère l'instrument prix aux firmes conduit à le préférer lorsque la réduction des émissions ne constitue pas un impératif urgent pour la société. Les instruments sont en revanche neutres lorsque les pentes des coûts et des bénéfices sont identiques<sup>23</sup>.

Ce résultat peut s'interpréter comme la volonté du régulateur de limiter les erreurs commises en choisissant l'un ou l'autre des instruments. Dans le cas du prix, l'erreur porte sur les bénéfices de l'abattement alors que dans le cas de la quantité elle concerne les coûts d'abattement.

Le résultat de Weitzman ne dépend cependant pas de l'incertitude sur les bénéfices dans la mesure où il est supposé que les incertitudes sur les coûts et les bénéfices de l'abattement sont statistiquement indépendantes. Stavins (1996) a formellement établi qu'en présence d'une telle dépendance, l'incertitude sur les bénéfices entre en ligne de compte dans le choix des instruments. L'auteur montre en effet, qu'une corrélation positive rend la réglementation par les quantités plus efficiente, alors qu'une corrélation négative favorise au contraire la l'instrument prix. Avec une corrélation positive, lorsqu'une taxe pigouvienne (taxe unitaire égale au dommage marginal) est utilisée pour contrôler les émissions, les firmes, face à un coût marginal d'abattement plus élevé que prévu, limitent leur effort d'abattement alors que le bénéfice marginal de l'effort d'abattement est devenu plus bénéfique que prévu. Ainsi la réponse naturelle des firmes au prix s'avère inappropriée. Lorsque la corrélation est négative, un coût plus élevé qu'attendu incite les firmes à réduire leur effort à un moment où le bénéfice marginal de cet effort est aussi particulièrement faible. La taxe induit dans ce cas les décisions appropriées de la part des firmes. Stavins (1996) établit ainsi que le choix d'un instrument de régulation basé uniquement sur l'incertitude des coûts peut conduire à des erreurs de décisions politiques dans la mesure où l'incertitude sur les bénéfices impactent également le choix optimal des instruments. L'impact de cet effet est par ailleurs proportionnel à l'importance de la corrélation et à l'ampleur des incertitudes. La neutralité des instruments en présence de pentes identiques disparaît également en présence de corrélation.

---

<sup>2</sup> Comme l'ont montré Roberts & Spence (1976) un meilleur résultat peut être obtenu d'un point de vue social si le régulateur utilise les deux instruments simultanément.

<sup>3</sup> Pizer (1999; 2002), Hoel & Karp (2001) et Newell & Pizer (2003) ont appliqué le résultat de Weitzman à la problématique du changement climatique notamment dans un contexte dynamique où le dommage marginal des émissions est une fonction du stock des émissions accumulées dans le temps.

S'appuyant sur la contribution de Weitzman (1974) un certain nombre de travaux ont comparé les instruments prix et quantités en prenant plus explicitement en compte la possibilité de changement technologique endogène.

**Mendelsohn (1984)** compare les deux instruments en présence d'incertitude sur les coûts et les bénéfices du processus de R&D. Il est montré que dans ce cadre la régulation par les **quantités** encourage toujours des niveaux de changement technique plus efficaces que l'instrument **prix**. Ce résultat s'explique par le fait qu'avec l'instrument prix, les firmes tendent à fournir une quantité soit excessive, soit insuffisante de R&D. En effet, dans la mesure où la firme a la possibilité d'ajuster à la fois sa technologie (en termes d'investissement en R&D) et son niveau d'abattement (production), cette double flexibilité aggrave la volatilité du niveau d'abattement et confère un avantage additionnel à l'instrument quantité comparé au résultat de Weitzman.

**Keohane (2003)** suppose également la possibilité de R&D. Il est supposé que l'effort de R&D peut être de manière équiprobable soit un succès soit un échec. Les résultats du modèle illustrent que l'avantage relatif entre les instruments **prix** et **quantité** dépend des coûts de R&D comparés aux bénéfices générés par l'innovation pour la société. Dans le cas où le coût de R&D est très élevé, la R&D n'est jamais engagée (cas certain) et les deux instruments de régulation deviennent équivalents. Lorsque les coûts de R&D sont suffisamment faibles comparés aux bénéfices d'abattement générés par l'adoption de la nouvelle technologie alors le résultat de Weitzman sur le choix des instruments reste toujours valable car la firme entreprend le projet de R&D quelque soit l'instrument. Ce résultat montre que la possibilité de R&D ne modifie pas le choix entre les deux instruments lorsque le rendement social de l'investissement en R&D est élevé (innovations importantes et coût espéré de la R&D faible).

Pour des coûts de R&D intermédiaires la décision de R&D de la firme diffère suivant l'instrument considéré. Ce comportement asymétrique conduit à préférer l'instrument quantité car il réduit le potentiel d'une décision de R&D inefficace. En effet, même si l'instrument prix incite davantage à faire de la R&D que l'instrument quantité, une telle incitation n'est pas forcément socialement préférable dans la mesure où la possibilité d'une R&D inefficace est aggravée par la plus grande flexibilité accordée à la firme qui réagit de manière excessive aux variations des coûts d'abattement (à la fois en termes de R&D et d'abattement). Le modèle suggère ainsi que même si le choix des instruments dépend toujours des pentes relatives des coûts et des bénéfices d'abattement une préférence pour l'instrument quantité est possible en présence de changement technique endogène.

Ainsi lorsque le planificateur social a pour objectif de maîtriser l'incertitude des coûts et des bénéfices, la possibilité de R&D, dans la mesure où elle confère aux firmes une plus grande flexibilité (et donc rend plus difficile de contrôler leur décision d'abattement), conduit à élargir l'ensemble des situations où l'instrument quantité est préféré d'un point de vue social à l'instrument prix.

## **B. Politiques environnementales et propriétés du marché de l'innovation**

La comparaison des différents instruments de politiques environnementales à inciter les firmes à la R&D et à l'adoption de nouvelles technologies moins émettrices a été effectuée par ailleurs à partir des conditions de fonctionnement du marché de la R&D. Les travaux engagés dans cette optique ont notamment étudié l'efficacité des différents instruments en présence de

situations contrastées relative à la structure du marché de R&D (monopole, duopole, ou entrée libre) et des effets de congestion liés à la nature de bien commun de la R&D (R&D privée socialement excessive) ou des effets des retombées positives liés à la nature de bien public de la connaissance (R&D privée socialement faible).

**Biglaiser et Horowitz (1995)** prennent explicitement en compte les interactions des firmes sur le marché de R&D. Ils considèrent une industrie concurrentielle polluante avec des firmes *ex ante* symétriques chacune pouvant engager des activités de R&D, mais asymétriques après la phase de R&D. L'innovation a pour effet de réduire les émissions pour la même quantité produite. La recherche est incertaine au sens où la nouvelle technologie est tirée de manière aléatoire d'une distribution cumulative identique pour toutes les firmes. Le coût d'investissement en R&D est fixe et donne droit à un tirage aléatoire qui peut être un échec ou un succès. Ce dernier pouvant être plus ou moins significatif. Le coût d'adoption (d'installation) est identique pour toutes les technologies quelque soit leur performance.

Le résultat central du modèle établit l'importance pour le régulateur, qui souhaite induire les niveaux socialement optimaux de R&D, d'adoption, de production et d'émission d'utiliser en tandem une **taxe pigouvienne** et un **standard technologique** incitant les firmes *in fine* à choisir la meilleure technologie disponible.

L'utilisation d'une politique de standard technologique comme complément à la taxe découle de la nécessité de contourner le pouvoir de marché dont dispose la firme innovante possédant la meilleure technologie. En effet, la seule utilisation de la taxe (ou de permis d'émission) conduit à un nombre insuffisant de firmes adoptant le meilleur standard dans la mesure où la firme innovante qui détient le monopole pratique systématiquement un prix de licence excessif (supérieur à son coût marginal de R&D) pour s'assurer des rentes. La démarche politique concernant le standard, après la phase de R&D mais avant que l'innovateur fixe son prix de licence, consiste à avoir une attitude indulgente en imposant un seuil d'acceptabilité minimal pour le standard afin d'élargir le choix d'adoption des firmes et d'introduire une concurrence entre les firmes innovantes pour limiter la rente de la firme possédant le meilleur standard. Ce mécanisme conduit finalement à l'adoption socialement optimale du meilleur standard.

Les auteurs étudient par ailleurs la façon dont la régulation affecte le nombre de firmes effectuant de la R&D par rapport à celui socialement optimal. Il est montré qu'en l'absence d'intervention publique le nombre de firmes effectuant de la R&D est d'un point de vue social soit insuffisant, soit excessif. Ce nombre est insuffisant si les firmes ne capturent pas suffisamment de rentes grâce à leur innovation. Une recherche excessive a lieu dans la mesure où les firmes ne tiennent pas compte de l'impact de leur décision de R&D sur la probabilité de succès des autres firmes. Il est montré dans ce contexte qu'une taxe plus sévère (par rapport à la taxe pigouvienne) réduit la R&D. En effet, avec une règle d'adoption plus stricte, les firmes qui étaient indifférentes entre faire ou ne pas faire de R&D trouvent plus profitables dorénavant d'éviter le coût fixe de R&D et d'acquiescer l'innovation. Toutefois, le régulateur a la possibilité d'augmenter la R&D en élevant le seuil minimal d'acceptabilité des standards (restriction de l'ensemble des standards pouvant être adoptés) sans réduire l'efficacité *ex post* puisque ce mécanisme impact positivement le rendement privé de la R&D *via* une hausse du prix de la licence.

**Parry (1995)** s'intéresse également à la **taxe optimale de second rang** (taxe égale ou non au dommage marginal) lorsque l'innovateur possède un pouvoir de monopole. L'auteur sépare

cependant le secteur de production du secteur de R&D. L'entrée est supposé libre sur les deux marchés. Les firmes dans le secteur amont engagent des projets de R&D pour développer une nouvelle technologie d'abattement pour les firmes en aval. La R&D est incertaine au sens où la probabilité que la nouvelle technologie soit découverte est positivement liée au nombre de firmes (de projets de recherche). En revanche la probabilité pour chaque firme de remporter la course à l'innovation diminue avec le nombre de firmes. La firme qui a du succès obtient un brevet et se trouve en position de monopole pour licencier sa technologie au secteur de production.

L'auteur distingue d'une part les scénarios de dommages linéaires et convexes et d'autre part la possibilité d'imitation ou non de la nouvelle technologie par les firmes en aval.

Lorsque les dommages sont linéaires, la taxe optimale s'avère inférieure au dommage marginal pour deux raisons principales. Tout d'abord, avec une taxe trop élevée (opportunité croissante d'adoption dans le secteur aval), l'entrée du nombre de firmes sur le marché de R&D devient excessive dans la mesure où celles-ci ne prennent pas en compte leur impact négatif sur la probabilité de succès des autres firmes déjà en place<sup>4</sup>. Ensuite en raison du prix de monopole pratiqué par l'innovateur, la diffusion de la nouvelle technologie reste socialement sous-optimale. En effet, une taxe trop élevée, conduit à un nombre plus faible de firmes en aval. Dans la mesure où les firmes qui restent sur le marché ont une propension à payer plus élevée pour la nouvelle technologie, une taxe plus élevée induit également un prix de licence plus élevé. La réduction de la taxe, conduit dans ce contexte, à une baisse du prix de la licence qui lui même réduit le nombre de firmes de R&D, tout en améliorant l'adoption technologique. Il est ainsi montré que la taxe peut être inférieure au dommage marginal pour contrecarrer le prix de monopole de l'innovateur et les effets de "bien commun" associés à la recherche.

Le cas de dommages environnementaux convexes introduit un troisième argument pour que la taxe soit inférieure au dommage marginal. Dans ce cas c'est seulement au-delà d'un seuil d'émission que le dommage environnemental devient significatif. En effet, lorsque la taxe est égale au dommage marginal, le revenu de l'innovateur excède le bénéfice social issu de l'innovation et exacerbe l'excès de R&D. Ceci s'explique par le fait que le gain marginal de l'innovateur *via* la licence reste constant alors que le bénéfice social marginal de l'innovation est décroissant en raison de la convexité des dommages.

La possibilité d'imitation réduit le pouvoir de monopole de la firme innovante et ainsi sa capacité à s'appropriier tout le bénéfice de l'innovation dans la mesure où pour freiner l'imitation et motiver l'adoption de son innovation il pratique un prix de licence moins élevé. Il s'avère dans ce cas que la taxe optimale peut en théorie excéder le dommage marginal si les effets combinés du prix de monopole, des externalités négatives de R&D et des dommages convexes possibles sont plus que compensés par l'effet d'imitation.

Ainsi pour les technologies issues du domaine public (supposant un accès libre), le niveau de la taxe sur les émissions peut être supérieur ou égal à la taxe pigouvienne. En revanche si la technologie est entre les mains du secteur privé, le prix de monopole pratiqué par l'innovateur

---

<sup>4</sup> Dans le modèle de Biglaiser & Horowitz (1995) la taxe optimale est égale au dommage marginal et les effets négatifs d'une taxe plus sévère ne s'expliquent pas de la même manière que dans le modèle de Parry (1995) dans la mesure où dans le premier cas les secteurs de production et de R&D sont intégrés et dans le second ils sont séparés. Par ailleurs, chez Parry l'entrée/sortie est libre dans les deux secteurs alors que pour Biglaiser & Horowitz (1995) seul l'entrée sur le marché de R&D est libre.

risque d'être trop élevé pour favoriser une diffusion optimale de la technologie, ce qui laisse supposer qu'une réduction de la taxe conduise à une baisse du prix de la licence et améliore la diffusion technologique. Dans ce cas il s'avère préférable d'utiliser d'autres instruments (subvention à la R&D) pour accroître l'effort d'innovation que de recourir à une taxe plus élevée.

Dans une extension du modèle précédant, Parry (1998) compare la **taxe pigouvienne** à d'autres instruments politique tels que les **permis d'émission échangeables** et le **standard de performance** en terme d'incitation et d'efficience sur le marché de R&D par rapport à l'optimum social de premier rang.

Il s'avère que l'efficience de second rang sur le marché de R&D n'est pas nécessairement plus faible avec les permis qu'avec une taxe pigouvienne. Il est montré que le degré de supériorité de la taxe sur par exemple les permis dépend de l'ampleur de l'impact des innovations sur la réduction des coûts d'abattement. Cette supériorité est la plus importante lorsque les innovations sont majeures dans la mesure où c'est pour ces innovations que l'impact à la baisse sur le prix des permis est le plus substantiel *ex post* (impliquant une diffusion insuffisante de l'innovation). La différence d'efficience entre la taxe et le standard de performance est plus importante mais toujours très sensible à la taille potentielle de l'innovation. De plus, les différences d'efficience entre les instruments s'éliminent plus ou moins si les instruments peuvent être ajustés à leur niveau pigouvien suite à l'innovation.

Même si en présence d'imitation une politique plus sévère peut être justifiée pour améliorer l'efficience du marché de R&D il s'avère que l'effet de l'imitation en soi n'implique pas nécessairement de larges inefficiences (contrairement au modèle précédent). Par exemple, lorsque le bénéfice privé de l'innovation est supérieur ou égale à la moitié du bénéfice social, l'efficience en termes de R&D de la taxe pigouvienne atteint typiquement 90% de l'efficience de premier rang. Ceci s'explique du fait que l'effet de la R&D excessive liée à la concurrence pour la rente d'innovation contrecarre l'effet d'imitation. Cependant si l'effet d'imitation conduit à une plus grande divergence entre les bénéfices privés et les bénéfices sociaux de l'innovation, une incitation à accroître la R&D peut avoir un impact significatif sur l'efficience. Autrement dit, l'effet de l'imitation doit être substantiel pour justifier une augmentation de la taxe ou des politiques complémentaires (subvention à la R&D).

Laffont et Tirole (1996) étudient l'impact incitatif des **permis d'émission** à la R&D et à l'adoption d'une nouvelle technologie non émettrice en séparant également les secteurs de R&D et émetteur. Une seule firme en amont s'engage dans la R&D. Le processus de R&D est soit un échec, soit un succès (technologie zéro émission). Plusieurs dysfonctionnements du marché des permis sont dans ce cadre mises en évidence. Les auteurs montrent que lorsque le gouvernement a la possibilité, en cas d'innovation, de mettre une pression à la baisse sur le prix de licence en donnant aux pollueurs potentiels la possibilité d'acheter des permis à un prix faible, l'innovateur se trouve obligé de pratiquer un prix de licence inférieur au prix des permis. A l'équilibre l'innovateur ne réalise plus de profit et donc plus de R&D. Les auteurs considèrent ensuite le cas où le gouvernement s'engage à ne pas émettre de nouveaux permis après le processus de R&D. Dans la mesure où le processus peut être un échec, le gouvernement est cependant obligé d'émettre des permis avant que la R&D ait lieu. Ce contexte provoque cependant deux inefficiences lorsque les permis ne sont pas retournés au gouvernement à un prix préétablis en cas de succès du processus de R&D. Premièrement même si l'innovateur s'engage à faire de la R&D son effort reste toujours socialement sous optimal. Deuxièmement les permis d'émission qui sont sur le marché provoquent des

émissions indésirables en cas d'innovation (alors que la diffusion optimale de la nouvelle technologie devrait supprimer toutes les émissions). Ainsi l'efficacité du marché des permis d'émission n'est rétablie que si le gouvernement peut prévoir la reprise des permis en cas d'innovation. Ce schéma conduit par conséquent à mettre en place un **marché d'options de permis** et non plus de droits à polluer et permet d'introduire de la flexibilité dans la régulation par le décideur politique du marché des permis.

Fischer *et al.* (2003) comparent les effets sur l'effort d'innovation et le bien être de différentes politiques environnementales (**taxe, permis gratuits et permis aux enchères**). Contrairement à Biglaiser et Horowitz (1995) et Parry (1995, 1998) le modèle fait abstraction de la course aux brevets et suppose qu'une des entreprises émettrices, peut engager des efforts de R&D pour améliorer sa technologie d'abattement et qu'elle est ensuite susceptible de licencier son innovation aux autres entreprises. Leur contribution met l'accent sur les effets des externalités générés par la R&D. L'appropriation de l'innovation par l'innovateur peut être incomplète : les autres firmes peuvent soit payer une licence pour adopter la nouvelle technologie soit utiliser gratuitement une imitation plus ou moins identique de la technologie brevetée. La nouvelle technologie est cependant toujours diffusée à l'industrie entière (par imitation ou par achat de licence) à l'équilibre.

Les auteurs montrent que les instruments politiques affectent la R&D à travers quatre effets distincts (les deux derniers effets ne s'appliquant qu'au cas des permis):

- l'effet lié aux économies de coût d'abattement. Du point de vue de l'innovateur cet effet renvoie à la propension des autres firmes à acquérir l'innovation pour réduire leur coût d'abattement. L'effet sur la R&D est positif quelque soit l'instrument politique.
- l'effet d'imitation : dans la mesure où la possibilité d'imitation réduit la propension à payer pour l'innovation, l'innovateur n'est plus capable de s'approprier totalement les rentes issues de son innovation. L'effet sur la R&D est négatif quelque soit l'instrument choisit.
- l'effet prix de l'adoption: en réduisant le prix des permis, l'innovation réduit la propension à acquérir l'innovation. L'effet sur l'incitation à innover est par conséquent négatif.
- l'effet lié aux paiements des émissions: cet effet concerne uniquement les permis aux enchères. Il porte sur la réduction pour l'innovateur des coûts d'acquisition des permis aux enchères en raison de l'impact de l'innovation sur le prix des permis. L'effet sur la R&D est positif mais faible en raison de l'hypothèse d'un grand nombre de firme sur le marché.

Comme le montre le tableau suivant l'impact incitatif à l'innovation des différents instruments dépend de l'importance relative de ces quatre effets.

Determinants of the incentives for innovation

	Emissions tax	Free permits	Auctioned permits
Abatement cost effect	+	+	+
Imitation effect	-	-	-
Emissions payment effect	0	0	+
Adoption price effect	0	-	-

Source: Fischer *et al.* (2003)

Au vu du tableau précédent qui synthétise les effets des différents instruments sur l'incitation à innover, les résultats de Fischer *et al.* (2003) rejettent l'idée d'une préférence systématique pour les permis vendus aux enchères sur la taxe d'émission, et de la taxe d'émission sur les permis gratuits.

Il est notamment montré que d'un point de vue incitatif il existe un seuil critique d'imitation tel que la taxe conduit à un niveau d'innovation plus (moins) élevé que les permis aux enchères lorsque l'imitation est inférieur (supérieur) à ce seuil critique. Cependant l'innovation est toujours plus importante avec un permis aux enchères et une taxe qu'un permis gratuit.

A la différence des contributions précédentes Helm et Schöttner (2008) s'intéressent aux modes de **subventions** pour inciter deux firmes à produire de l'électricité à partir de deux technologies propres différentes. Les firmes ont la possibilité d'investir chacune en R&D sur une des technologies pour réduire leur coût de production. Toutefois l'innovation d'une firme n'est pas complètement appropriable dans la mesure où ses efforts bénéficient en partie également à son concurrent (innovation générique). Le processus d'innovation est supposé stochastique : l'investissement améliore la distribution de l'innovation au sens de la dominance stochastique de premier ordre et réduit ce faisant le coût espéré de production. Les auteurs considèrent le choix optimal du décideur public entre deux instruments: une **subvention non discriminatoire** de la production des deux firmes et une **subvention concurrentielle** (concours d'innovation) soutenant la technologie la plus prometteuse.

Une subvention concurrentielle renforce les incitations à innover des firmes dans la mesure où elles se concurrencent pour remporter le tournoi même si les retombées technologiques freinent cet effet incitatif et l'éliminent lorsque les retombées sont parfaites. Dans le cas de la subvention non discriminatoire l'effet incitatif provient du fait qu'*ex ante* la production espérée de chacune des firmes est plus élevée. Les auteurs montrent que lorsque les retombées sont complètes, la subvention non discriminatoire induit toujours plus d'effort d'innovation. En effet les retombées de connaissances ont un impact négatif plus sévère sur les incitations à innover dans le cas du concours que dans le cas de la subvention non discriminatoire dans la mesure où plus ces retombées sont importantes plus la probabilité de remporter le tournoi devient faible.

Toutefois, les auteurs montrent que même en l'absence de retombées la subvention non discrétionnaire domine la subvention concurrentielle. La raison expliquant ce résultat est que le coût marginal de production sur chacune des technologies est croissant avec la quantité d'électricité produite (rendements d'échelle décroissants). Ce phénomène favorise de ce fait le schéma non discriminatoire où les deux firmes participent à la production.

La prise en compte des caractéristiques du marché de la R&D affecte la conception et le choix des instruments politiques du point de vue du bien être social. Ces changements sont d'une part lié au pouvoir de monopole de l'innovateur qui oblige le décideur public à arbitrer entre les incitations à l'innovation et les incitations à la diffusion des nouvelles technologies. Ils découlent également des propriétés de *bien commun* et de *bien public* des activités et des résultats de la R&D. Ainsi suivant l'ampleur des distorsions créées par ces caractéristiques le planificateur social est amené soit à adapter la conception d'un instrument donné (permis d'émission, taxe, subvention) soit à changer d'instrument politique. Autrement dit, la possibilité de R&D et l'intégration des modes de fonctionnement du marché de l'innovation dans le processus de décision politique conduit à moduler la conception et le choix des instruments suivant le contexte en vigueur. De même la présence, au delà des externalités

environnementales, de défaillances sur le marché de la R&D conduit le décideur politique à recourir à plusieurs instruments (taxe / permis et standard, taxe / permis et subvention) pour pouvoir améliorer le bien être social.

### C. Temporalité et incertitude des politiques environnementales

Au delà du choix de l'instrument, un aspect critique dans le processus de décision politique a trait à la façon dont la temporalité et l'incertitude des politiques environnementales affectent les efforts de R&D et l'adoption technologique.

Un certain nombre de travaux ont abordé la temporalité des décisions politiques par rapport au degré et à la capacité d'engagement des décideurs publics. L'engagement ou son absence sont ici modélisés comme différentes structures de mouvements dans un jeu entre le gouvernement et les firmes. Lorsque le gouvernement s'engage il annonce une fois pour toute sa politique (une taxe, nombre de permis d'émission) avant que les firmes réalisent leur effort de R&D, tandis que s'il ne peut s'engager, l'instrument est ajusté *ex post* aux décisions et aux résultats d'investissement des firmes. L'absence d'engagement a l'avantage d'être plus réactive et flexible - permettant d'utiliser un ensemble plus étendue d'instruments ou d'ajuster leur conception - mais pâtit également du fait que les décisions d'investissement peuvent être biaisées par la volonté des firmes d'influencer la politique environnementale. Il peut par conséquent exister des circonstances où le non-engagement peut aboutir à un bien être social supérieur comparé au cas où le gouvernement s'engage une fois pour toute.

Une seconde piste de recherche liée à la capacité d'engagement a trait à l'incertitude des politiques environnementales futures. Dans ce cas l'impact incitatif des politiques n'est plus strictement lié à la structure du jeu mais dépend de l'incertitude inhérente aux décisions politiques à long terme qui peuvent évoluer et changer dans le temps.

**Bansal et Gangopadhyay (2005)** examinent l'intervention optimale d'un décideur public qui doit mettre en place un **standard technologique**. Leur modèle suppose une firme monopolistique qui entreprend de la R&D en présence de consommateurs qui ont une disposition à payer pour des produits plus propres. Le résultat du processus de R&D est incertain au sens où l'ampleur de l'innovation n'est pas connue à l'avance. Par ailleurs, si le régulateur est capable d'observer le résultat de l'innovation, il ne connaît pas l'effort de R&D de la firme. Plus la baisse du coût d'abattement issu de l'innovation est importante, plus l'incitation à l'abattement est importante. Cependant, cette incitation est moins forte pour la firme que pour le planificateur qui prend non seulement en compte les préférences des consommateurs pour les produits plus propres (comme la firme) mais aussi les externalités environnementales. Par conséquent, le planificateur souhaite induire les firmes à davantage d'abattement qu'elles ne le feraient par elles-mêmes. Pour cela il peut décider d'un standard qui correspond soit à la technologie disponible ou à celui d'une technologie plus avancée qui risque cependant d'être trop ambitieux pour pouvoir être appliqué. Les auteurs comparent deux régimes politiques différents. Dans le premier, le décideur public attend la réalisation de l'innovation puis fixe un standard correspondant à la meilleure technologie disponible et impose une amende si la firme ne le respecte pas (**politique BAT *ex post***). Dans le second régime, le décideur public anticipe un standard correspondant à une technologie plus avancée avant de savoir si celle-ci pourra ou non être développée (**politique d'engagement *ex ante***).

Le modèle suggère que lorsque le régulateur connaît l'ampleur de l'innovation possible mais ne sait pas si elle va se réaliser, le standard optimal se trouve entre les standards le plus ambitieux et le standard existant, ces derniers étant sous-optimaux. Les auteurs suggèrent aussi qu'il est toujours préférable pour le régulateur d'anticiper le succès plutôt que d'attendre pour que l'innovation se réalise. Une politique d'engagement *ex ante* à un standard fournit les incitations appropriées aux firmes d'investir en R&D.

En effet, lorsque les consommateurs sont disposés à payer pour des produits plus propres, une politique de laissez-faire (engagement *ex ante*) conduit à un effort de R&D plus élevé que dans le cas d'une politique BAT. La menace d'un standard plus stricte (BAT) fait que le profit de la firme devient inférieure à celui qu'elle pourrait réaliser avec une technologie d'abattement plus coûteuse. Alors que la firme est incitée à développer la meilleure technologie dans le cas où le planificateur engage sa politique *ex ante*, l'intervention politique *ex post* consistant à ajuster le standard à la meilleure technologie disponible (BAT) démotive l'initiative de la firme de développer de nouvelles technologies. Ainsi une politique d'engagement *ex ante* réduit l'incertitude des bénéfices issus de l'innovation (contrairement à une politique réactive) et incite à la R&D.

Requate (2005) considère une firme monopolistique qui s'engage à faire de la R&D et peut vendre sa technologie à coût d'abattement plus faible aux autres firmes. Les firmes polluantes ne sont pas complètement identiques. Leurs besoins d'adoption n'étant pas les-mêmes, la fonction de demande pour la nouvelle technologie est décroissante avec le prix.

Le résultat de la R&D est incertain: la probabilité de succès dépend de l'effort de R&D. Si la R&D est un succès, l'innovateur produit la technologie à un coût marginal constant. Les incitations à la R&D et à l'adoption sont étudiées pour les **permis gratuits**, les **permis aux enchères** et la **taxe**. Le régulateur peut structurer sa politique suivant quatre modalités (temporelles) différentes : (A) un **engagement *ex ante* avant la R&D** ; (B) un **engagement *ex ante* avant la R&D sur un menu politique** qui tient compte du résultat de la R&D ; (C) un **engagement politique *ex-interim*** après observation de la R&D mais avant l'adoption de la nouvelle technologie ; et (D) une **régulation *ex post*** après R&D et adoption. Le régulateur est capable d'influencer directement l'effort de R&D dans les cas A et B, tandis que dans le cas C il intervient sur le niveau d'adoption et le niveau d'abattement et dans le cas D son influence porte uniquement sur le niveau d'abattement. Pour ce qui est de la firme spécialisée en R&D, elle prend la taxe comme donnée sous les scénarios A, B et C, alors que sous D elle peut l'influencer. Dans le cas des permis, le monopoliste peut influencer le prix du permis quelque soit le scénario.

Il est montré que les deux instruments (taxe et permis) sont équivalents dans le scénario D, dans la mesure où le régulateur, étant le dernier à décider, connaît le dommage marginal et le coût agrégé d'abattement marginal et est capable de réaliser son objectif d'abattement en ajustant soit le niveau de la taxe, soit le nombre de permis d'émission correspondant.

Le résultat principal du modèle est que l'engagement *ex ante* sur un menu politiques (B) domine tous les autres régimes politiques. En effet, un engagement politique précoce - avant l'activité de R&D - est socialement bénéfique dans la mesure où dans ce cas la politique environnementale a un effet directe sur l'effort de R&D. Par ailleurs le scénario B étant basé sur un menu politiques il peut toujours réaliser le scénario A. De plus le menu de taxe domine les permis dans le cas du régime (B). En effet, lorsque le régulateur s'engage avant la tarification de la nouvelle technologie par la firme innovatrice, celle-ci n'est plus capable

d'influencer la taxe alors qu'elle est capable d'influencer le prix des permis à travers sa stratégie de tarification ou sa stratégie de production (nombre d'unités de la nouvelle technologie produite). Avec une tarification plus élevée, la demande pour la nouvelle technologie baisse. La demande de permis d'émission plus importante qui en résulte provoque une augmentation du prix des permis et contribue à augmenter la volonté des firmes à payer pour la nouvelle technologie d'abattement. Le pouvoir du monopole conduit ainsi à une distorsion plus sévère avec les permis que la taxe sur le marché de la nouvelle technologie.

De plus, avec l'engagement *ex-interim* (C), la taxe optimale de second rang excède le dommage marginal. Ce résultat s'explique par le fait que le tarif excessif pratiqué par le monopole conduit à une adoption sous-optimale de la nouvelle technologie. Pour compenser cette distorsion, le régulateur augmente la propension à payer des firmes polluantes en fixant une taxe supérieure au dommage marginal. Ce résultat est par conséquent différent de celui obtenu par Parry (1995) où la baisse de la taxe réduit le prix de la licence et favorise la diffusion technologique. En revanche, dans le cas des scénarios A (cas *ex-ante* similaire à Parry) et B où le régulateur est capable également d'influencer l'effort de R&D, la taxe peut être plus ou moins élevée que le dommage marginal. La raison est que dans ces scénarios le régulateur souhaite influencer à la fois les niveaux de R&D et d'adoption.

Une comparaison plus précise entre les scénarios s'avère délicate. Par exemple le régime (A) peut ou ne pas dominer les régimes C et D. Avec (A) le régulateur est capable de tenir compte de la valeur sociale de l'innovation et des coûts de R&D. Cependant, il existe toujours le risque d'une taxe erronée en cas d'échec de la R&D. Le classement entre les régimes (C) et (D) n'est pas non plus immédiat. Même si une fois que la R&D est un succès (C) domine (D) (dans la mesure où le régulateur peut tenir compte du comportement monopolistique de la firme innovante) le régime (C) peut induire une R&D excessive *via* le prix de la licence.

Une solution de premier rang peut être obtenue si le régulateur utilise trois instruments simultanément: une taxe sur les émissions pour réduire la pollution (abattement), une subvention sur les unités produites pour inciter le monopole à augmenter sa production et une subvention pour égaliser la valeur privée de l'innovation (celle du monopole) et la valeur sociale de l'innovation. Toutefois, même avec ces trois instruments, le choix de la temporalité reste critique : dans la mesure où avec l'engagement sur la taxe la fonction de demande pour la nouvelle technologie est moins élastique, les subventions requises seront plus faibles que dans le cas des permis pour obtenir la solution de premier rang.

**Tarui et Polasky (2005)** comparent différentes temporalités et instruments lorsque l'incertitude sur les dommages environnementaux se résout avec le passage du temps en présence d'une firme susceptible de réduire son coût d'abattement *via* la R&D. La firme agit de manière stratégique au sens où elle prend en compte la possibilité du gouvernement d'ajuster sa politique *ex post* suite à la réalisation d'une innovation et suite aux nouvelles informations sur les dommages. Les auteurs distinguent deux temporalités possibles pour la politique : (1) une **politique discrétionnaire** pouvant être actualisée suite à de nouvelles informations sur les dommages et à l'investissement réalisé par la firme et; (2) une **politique réglementaire figée** où le régulateur s'engage sur une politique environnementale avant la résolution de l'incertitude sur les dommages et avant l'investissement réalisé par la firme. Les auteurs comparent dans ce contexte deux instruments politique : la **taxe** et le **standard**. Ces instruments sont choisis respectivement avant et après l'investissement de la firme en R&D.

Les auteurs montrent que lorsque l'incertitude sur le dommage environnemental est faible une politique réglementaire est préférable à une politique discrétionnaire. Dans ce cas éviter la distorsion stratégique de la décision d'investissement de la firme s'avère plus important que l'ajustement de la politique aux nouvelles informations. En revanche, lorsque l'incertitude est importante la politique discrétionnaire s'avère préférable d'un point de vue social car elle permet de tenir compte des nouvelles informations disponibles sur les dommages.

La comparaison entre les deux instruments montre que dans le cas d'une politique réglementaire, la taxe et le standard aboutissent au même résultat. Il est en effet possible de concevoir chacun des instruments de façon à ce que le bénéfice marginal espéré de l'abattement soit égal au coût marginal (après investissement). Les deux instruments ne sont cependant pas identiques avec une politique discrétionnaire. Sachant qu'avec une politique discrétionnaire la firme peut agir de manière stratégique, le standard conduit la firme à baisser son investissement de R&D pour ne pas provoquer un standard plus stricte. Lorsque c'est la taxe qui est ajustée, la firme est incitée à intensifier la R&D car un coût d'abattement plus faible induit le régulateur à réduire la taxe.

Les modèles qui suivent s'intéressent non pas à la temporalité d'intervention du planificateur social mais aux incertitudes qui caractérisent le processus de décision politique.

**Farzin et Kort (2000)** étudient le choix du niveau de R&D d'une entreprise pour réduire l'intensité de pollution de ses activités en présence d'une incertitude sur la politique de taxation des émissions polluantes. Les auteurs distinguent deux types d'incertitudes : une **incertitude sur le niveau future de la taxe** en supposant connu sa date d'entrée en vigueur et une **incertitude sur le calendrier d'augmentation de la taxe** dont le niveau est connu d'avance. Il est montré que dans le premier cas une augmentation de l'incertitude conduit la firme à réduire l'investissement sur la technologie d'abattement par rapport au cas certain, la firme préférant reporter une partie de ces investissements à la date de réalisation de l'augmentation de la taxe. Bien que le modèle ne raisonne pas dans le cadre d'un investissement irréversible, ce résultat est similaire à ceux obtenu dans le cas des modèles d'option d'attente où une augmentation de l'incertitude met en suspens l'investissement. En revanche dans le cas d'une incertitude calendaire, la firme augmente la R&D sur la technologie d'abattement pour pouvoir réduire son coût d'abattement au cas où la taxe deviendrait effective.

**Ulph et Ulph (2009)** considèrent la problématique d'engagement à long terme des pouvoirs publics pour inciter les entreprises à réaliser des efforts de R&D. La difficulté d'engagement pour le gouvernement en place (notamment sur une politique à long terme de taxation des émissions) s'explique par la possibilité que les gouvernements futurs préoccupés par d'autres priorités accordent une importance différente à l'environnement et les conduisent à dévier des perspectives envisagées par le gouvernement actuel. Cette possibilité crée une incertitude politique qui affecte à la fois les décisions de R&D du secteur privé et la conception optimale des instruments politiques mis en place par le gouvernement au pouvoir.

Si le gouvernement peut s'engager de manière crédible sur le niveau des taxes futures alors il peut induire l'investissement en R&D socialement optimal. Toutefois la façon de concevoir la politique environnementale dépend des coûts des projets de R&D. Si l'ampleur de l'investissement est suffisamment faible il peut suffire de s'engager sur un niveau unique de taxe qui sera imposé en fonction de l'investissement réalisé. En revanche, si l'ampleur de

l'investissement est élevée alors le décideur public doit s'engager sur un menu de taxes et utiliser la menace d'augmenter la taxe si les firmes n'investissent pas suffisamment.

L'absence d'engagement crédible à long terme et l'incertitude politique qui en résulte provoque un effet asymétrique sur la décision politique du gouvernement en place et les décisions des firmes. L'impossibilité de prévoir le comportement des gouvernements à venir augmente l'incitation du pouvoir en place à concrétiser les projets de R&D environnementale (étant donné l'importance qu'il accorde à l'environnement comparé aux gouvernements à venir et sa perte de contrôle sur les décisions futures) alors qu'elle réduit les incitations du secteur privé à investir dans de tels projets. Une des conclusions du modèle est que si le degré d'incertitude que les gouvernements futurs accordent une importance moindre à l'environnement est suffisamment élevé alors le recours du gouvernement aux seules politiques environnementales (taxation) pour stimuler la R&D ne peut être suffisant et qu'il devient nécessaire d'utiliser des politiques technologiques (subventions à la R&D) pour inciter le secteur privé à investir.

Les travaux que nous avons passés en revue montrent que la prise en compte de la capacité ou non d'engagement des pouvoirs publics et l'incertitude sur les décisions politiques affectent de manière importante l'incitation du secteur privé à engager des investissements de R&D. Tout d'abord, lorsque la R&D est incertaine ou les investissements dans ce domaine sont significatifs il s'avère préférable pour le planificateur social de s'engager *ex-ante* pour influencer le niveau d'investissement tout en adoptant un système de taxation qui intègre la nature stochastique du processus de R&D. L'engagement *ex-post* en revanche a pour inconvénient, lorsque les firmes agissent de manière stratégique, de générer des activités d'influences pour orienter ou biaiser les décisions politiques. Il s'avère également nécessaire lorsque le décideur politique en place ne peut contrôler les décisions de ses successeurs mais que les risques de dommages environnementaux exigent de trouver des solutions innovantes, d'accompagner la politique environnementale par une politique technologique. Enfin si l'incertitude sur la sévérité ou l'ampleur des politiques a un impact négatif sur le niveau de R&D, en revanche une incertitude sur la temporalité de mise en place d'une politique clairement définie semble favoriser les activités d'innovation dans la mesure où elle conduit les firmes à engager des projets exploratoires pour mieux se préparer à l'éventuelle mise en place de la politique environnementale.

## 2. Politiques environnementales et allocation des efforts de R&D entre plusieurs technologies

A la différence des modèles présentés dans le chapitre précédent qui s'intéressent à l'impact des politiques environnementales et des différents instruments sur le niveau de R&D, ce chapitre est consacré aux travaux qui examinent les politiques environnementales suivant leur impact sur les trajectoires d'innovation en présence de plusieurs technologies. L'accent est mis sur les implications politiques lorsque les firmes et/ou le décideur public ont la possibilité d'allouer leur effort entre plusieurs activités de natures différentes (projets de R&D ou abattement) ou plusieurs projets de R&D. Cette partie se réfère essentiellement aux travaux menés dans le cadre des modèles de croissance endogène (Baker et Shittu, 2008).

Certaines contributions abordent la question de la coordination entre *politique environnementale* et *politique d'innovation* en présence d'incertitude (sur le changement technique mais aussi les dommages climatiques). Le choix du décideur politique se fait entre des investissements visant à réduire les émissions face aux risques de dommages climatiques et des investissements en R&D pour développer des technologies permettant des niveaux d'abattement plus élevés. A chaque politique correspond un type spécifique de changement technique : par la pratique dans le cas d'une politique d'abattement et par la recherche dans le cas d'une politique d'innovation (Section A).

D'autres modèles prennent en compte plus précisément les caractéristiques technologiques afin de mieux comprendre l'impact de la réglementation sur le niveau et l'allocation des efforts de R&D entre plusieurs projets technologiques et la diversification technologique en présence d'incertitudes soit sur les dommages, soit sur le processus de R&D ou plus rarement les deux à la fois (Sections B, C et D). Enfin, l'examen porte sur l'allocation des efforts de R&D et les choix technologiques en fonction des différents instruments de politiques environnementales (Section E).

### A. Arbitrages entre politique environnementale et politique technologique

Une orientation importante a consisté à explorer l'articulation entre *politique environnementale* (abattement des émissions ou mise en place d'une taxe carbone) et *politique technologique* (subventions des activités de R&D) en présence d'incertitudes soit sur le changement technique, soit sur les dommages climatiques.

En s'appuyant sur un modèle d'option réelle, Baudry (2000) utilise les *dommages climatiques* issus de la concentration des émissions de GES comme critère de sélection entre deux politiques alternatives : (a) l'abattement immédiat des émissions en utilisant une technologie existante mais coûteuse (b) un programme de R&D sur une nouvelle technologie qui se caractérise par un niveau d'émission plus faible que la technologie existante. Au-delà d'un seuil de concentration, l'innovation technologique constitue ainsi une option pour garantir un environnement où le stock souhaité de CO<sub>2</sub> est moins élevé. L'article suppose une *incertitude*

*technologique* au sens où la R&D ne conduit pas forcément immédiatement à l'arrivée d'une innovation technologique<sup>5</sup>.

Le modèle s'intéresse dans un premier temps aux interactions entre le changement technique et le niveau d'abattement des émissions. Il montre que le niveau optimal d'abattement (i) est moins élevé en présence de R&D (possibilité de changement technique) et ; (ii) plus élevé durant le processus de R&D (en raison de l'incertitude technologique) qu'après le succès technologique. Intuitivement, une fois que le programme de R&D est lancé, le décideur s'attend à ce que l'innovation technologique se réalise dans un avenir relativement proche et il s'avère ainsi optimal de réduire l'abattement en attendant le changement technique. Dans ce cadre, une augmentation temporaire des émissions n'est par conséquent pas nécessairement incompatible d'un point de vu social et correspond à la durée pour développer une nouvelle technologie moins émettrice. Dans un deuxième temps, l'auteur interprète la R&D comme une option et détermine le seuil socialement optimal du niveau de concentration à partir duquel sera lancé le programme de R&D. Le modèle explicite des régions optimales d'attente avant de lancer le programme de R&D et d'exercice de l'option pour investir dans le programme de R&D en fonction du niveau de concentration et du niveau des émissions de la technologie existante.

**Bosetti et Drouet (2005)** analysent l'influence de l'*incertitude technologique* sur la R&D et le niveau d'abattement des émissions dans le cadre d'une version stochastique du modèle de croissance endogène RICE-FEEM intégrant les interactions entre les activités économiques et le changement climatique. Le changement technique peut être déclenché soit par une *politique technologique* (amélioration technique par la recherche), soit par une *politique environnementale* d'abattement (amélioration technique par la pratique). L'incertitude porte sur l'efficacité des deux processus d'amélioration. En combinant les cas d'efficacité élevée et faible pour chacun des processus, les auteurs distinguent 4 scénarios d'efficacité probabilisés.

Ils montrent que lorsque le changement technique est perçu comme stochastique, les dépenses en R&D sont plus élevées et le niveau d'investissement dans l'apprentissage par la pratique moins élevé que lorsque le changement technique est modélisé de manière déterministe. La prise en compte de l'incertitude et l'arrivée possible de nouvelles informations conduit à un niveau de R&D plus élevé surtout dans le cas d'un scénario ambitieux de stabilisation de la concentration des émissions à long terme. En considérant la flexibilité de faire marche arrière dans le cas où la recherche n'aboutit pas à des ruptures technologiques, les investissements immédiats en R&D s'avèrent ainsi cruciaux. De même, si l'on prend en compte l'incertitude sur l'apprentissage par la pratique, même s'il s'avère important d'engager un certain niveau d'abattement, celui-ci s'avère modéré en raison des effets conjugués de l'incertitude lié à l'apprentissage par la pratique et du coût à court terme élevé de l'abattement. A court terme et en présence d'incertitude, une politique environnementale modérée et une politique technologique de soutien actif s'avèrent donc plus effectifs en termes de coût-bénéfice.

**Goel et Hsieh (2006)** considèrent le choix d'un décideur politique entre une **taxe pigouvienne** pour inciter une firme monopolistique à réduire ses émissions et une **subvention** pour l'inciter à davantage de R&D afin d'accroître les chances de découverte d'une technologie non polluante. Il est supposé que l'effort de R&D accroît la probabilité d'occurrence de l'innovation avec cependant une productivité décroissante. La taxe augmente le coût de

---

<sup>5</sup> L'incertitude est cependant exogène dans la mesure où la R&D n'affecte pas la probabilité d'arrivée de la technologie.

production et incite à la R&D. Tandis que la subvention altère directement l'incitation à la R&D.

Les auteurs comparent les effets des changements de la taxe et de la subvention sur les niveaux de production et de R&D de la firme. Il est montré que pour un niveau déjà élevé de la taxe, une hausse de celle-ci a un effet ambigu sur la R&D en raison de son effet dual : d'une part une taxe plus importante incite à davantage de R&D, d'autre part il existe un effet indirect via la production qui réduit les incitations à la R&D en raison d'une production réduite suite à la taxe. Par conséquent lorsque la taxe est déjà élevée, il s'avère optimale de subventionner la R&D. En effet, tandis qu'une taxation plus élevée internalise les externalités de pollution, elle a un effet néfaste sur l'innovation technologique. Ce résultat met en avant la nécessité d'accompagner la politique environnementale par une politique technologique.

Dans le cas de la subvention, celle-ci réduit le coût de R&D et donc incite la firme à davantage de R&D. Mais elle peut avoir aussi un impact négatif sur les émissions (via une augmentation de la production) si la R&D est un échec. Ainsi, en l'absence de coordination entre les deux types de politiques, la politique technologique peut involontairement infirmer la politique environnementale tant que la R&D ne se traduit pas par un succès.

**Bohringer et Rutherford (2007)** étudient également dans le cadre d'un modèle de croissance endogène l'arbitrage optimal entre *politique de taxation et politique technologique* en présence d'une *incertitude* sur l'arrivée d'une *innovation de rupture*. Les auteurs distinguent trois technologies de production d'énergie : (1) une technologie disponible carbonée à faible coût qui ne fait pas l'objet de R&D ; (2) une technologie non carbonée disponible mais non opérationnelle dans le scénario sans contrainte sur les émissions en raison de son coût trop élevé et qui peut être améliorée par la R&D ; (3) une technologie de rupture sans émission et à bas coût qui est indisponible mais qui pourrait l'être dans l'avenir. Cette solution de rupture est moins coûteuse que la technologie disponible non carbonée et sa performance peut être améliorée à travers la R&D dès qu'elle devient disponible. L'incertitude porte sur la disponibilité future de cette technologie.

L'article montre qu'en présence d'une contrainte sur la concentration des émissions, la taxe carbone tend à être utilisée en dernier ressort: le décideur politique exploite en premier les possibilités de R&D offertes par la technologie non émettrice existante ainsi que sur la technologie de rupture une fois que celle-ci est disponible. Plus particulièrement, la R&D sur la technologie non émettrice existante - qui n'est pas compétitive en l'absence de contraintes climatiques - sert de couverture contre le risque d'absence de rupture technologique. La présence d'une incertitude technologique conduit par conséquent à modérer la politique de taxation optimale par rapport à une situation sans incertitude technologique. La taxation, en raison de son coût social élevé, s'avère seulement significative pour accélérer la R&D une fois que la rupture a lieu et pour jouer le rôle d'un instrument de dernier recours lorsqu'il s'avère qu'elle n'aura jamais lieu.

Ces modèles indiquent notamment qu'en présence d'incertitude, le décideur public peut modérer l'abattement immédiat ainsi que la politique de taxation et accentuer les investissements en R&D afin de développer des technologies plus efficaces pour une réduction à long terme des émissions.

A la différence des contributions précédentes qui supposent une incertitude technologique, **Baker (2009)** considère un processus de R&D déterministe et analyse l'impact de

*l'incertitude des dommages climatiques sur l'arbitrage entre politique climatique et politique technologique* pour réduire les coûts d'abattement futurs. Le modèle considère une technologie énergétique non carbonée dont le coût baisse avec l'effort de R&D. L'augmentation de l'incertitude est définie comme un étalement à moyenne constante (*Mean Preserving Spread* - MPS) des dommages. Deux profils d'augmentation de l'incertitude sont considérés: (1) des dommages élevés avec probabilités croissantes affectant les queues de la distribution mais maintenant la moyenne inchangée et ; (2) un étirement de la distribution autour de la moyenne signifiant des dommages marginalement plus élevés qu'attendus. Il est montré qu'un abattement immédiat plus élevé constitue davantage une couverture contre la possibilité à terme de catastrophes majeures pour lesquels l'abattement optimal devra être total. La R&D, elle, fournit plutôt une assurance contre la possibilité que le dommage climatique soit marginalement plus grave qu'attendu. Dans ce cas il semble préférable de soutenir le changement technologique avant de réduire les émissions. La raison est que si les dommages sont marginalement plus graves qu'attendu mais non catastrophiques alors l'amélioration de la technologie génère deux types de bénéfices: le coût d'un niveau donné d'abattement est plus faible *et* l'abattement optimal est plus élevé à terme. En revanche, dans le cas d'une catastrophe, l'amélioration de la technologie n'impliquera pas un abattement plus élevé (qui doit être total à terme), mais seulement permettre des économies sur le coût d'abattement. Dans la mesure où la probabilité de ces économies de coûts est plus faible pour des dommages catastrophiques, l'investissement optimal en R&D reste plus faible.

Les modèles présentés montrent que l'incertitude technologique conduit à court terme à un niveau d'abattement plus faible et à un niveau de R&D plus élevé. Il s'avère aussi qu'un niveau d'abattement plus faible est une couverture contre la possibilité d'amélioration technologique permettant de réduire dans l'avenir plus efficacement les émissions. Ces résultats n'ont toutefois pas les mêmes explications suivant les modèles considérés. Suivant les cas, les deux politiques sont soit considérées comme des substituts, soit représentent une couverture contre différents profils d'incertitude (sur les dommages par exemples) ou alors sont complémentaires et doivent être étroitement coordonnées (voir aussi section précédente).

## **B. Allocation des efforts de R&D et incertitudes environnementales / politiques**

Dans les modèles précédents l'objectif consistait à déterminer l'arbitrage entre abattement immédiat et R&D en présence soit d'une incertitude technologique, soit d'une incertitude sur les dommages climatiques. Les contributions que nous présentons dans cette section s'intéressent d'avantages aux politiques et stratégies de R&D en essayant de mieux rendre compte des attributs technologiques affectant l'allocation des efforts de R&D des agents.

Les modèles présentés dans cette section supposent que l'incertitude porte soit sur les dommages climatiques soit sur la politique de taxation du carbone. Le processus de R&D est supposé déterministe. Suivant les articles considérés, les auteurs abordent soit le point de vue d'une firme, soit celui d'un planificateur central. Il s'agit de modèles à deux périodes. La R&D a lieu uniquement durant la première période. Durant cette période le décideur est incertain du niveau de la taxe (ou des dommages climatiques) pouvant se réaliser à la seconde période et donc des bénéfices liés au changement technique. Cette incertitude est résolue au début de la seconde période et permet de décider du niveau d'abattement permettant de maximiser le profit (ou minimise les coûts sociaux) en bénéficiant des changements induits par la R&D.

Dans une série d'articles E. Baker et ses co-auteurs ont analysé l'allocation des efforts de R&D en présence de différentes technologies énergétiques. Un apport important de leurs travaux consiste à distinguer plusieurs structures de changement technique induites par la R&D *via* leur impact différencié sur le coût d'abattement (Baker *et al.*, 2008). Ils montrent ainsi que les caractéristiques technologiques ont des conséquences importantes sur les stratégies/politiques d'allocation de la R&D en présence d'incertitude sur les dommages ou la politique climatique.

De manière générale, les auteurs distinguent 4 types de changement technique : (1) une réduction du coût de production des énergies alternatives non carbonées (RTA) ; (2) une réduction de l'intensité d'émission des technologies utilisant des inputs carbonés (RTC) ; (3) une amélioration généralisée de l'efficacité énergétique qui conduit à un output plus élevé avec le même niveau d'input énergétique et ; (4) une amélioration de l'efficacité seulement des énergies carbonées qui réduit uniquement le prix des énergies fossiles.

Baker *et al.* (2006) adoptent dans le cadre d'un modèle analytique et une version stochastique du modèle de croissance DICE<sup>6</sup>, le point de vue d'un décideur public qui doit allouer de manière socialement optimale les investissements de R&D entre les technologies carbonées (RTC) et non carbonées (RTA) en présence d'*incertitude sur les dommages climatiques*.

Le modèle montre que l'impact sur la R&D de l'augmentation de l'incertitude climatique reste ambigu. Cet impact dépend des caractéristiques technologiques et du profil d'augmentation de l'incertitude. Lorsque la probabilité de dommages élevés augmente, la R&D sur la technologie non carbonée s'intensifie tandis que celle sur la technologie carbonée s'affaiblit. Cette dynamique suggère ainsi que la RTA agit comme une couverture contre l'incertitude climatique. En revanche la RTC, s'il constitue une stratégie optimale en l'absence d'incertitude, devient moins attractive lorsque des dommages élevés deviennent plus probables. Dans ce dernier cas, les caractéristiques des technologies carbonées sont telles que le changement technique ne permet pas de réduire de manière significative le coût d'un abattement substantiel.

Avec une augmentation de l'incertitude telle qu'à des dommages croissants correspondent des probabilités décroissantes, la R&D sur la technologie non carbonée augmente dans un premier temps avec le niveau des dommages. En revanche, la R&D sur les deux technologies diminue lorsque les dommages excèdent un certain seuil. En effet, au fur et à mesure que l'on considère des niveaux de dommages de plus en plus élevés, la probabilité d'avoir un dommage plus important diminue. Ce qui a pour conséquence aussi de baisser la probabilité de devoir procéder à un abattement significatif des émissions. Ainsi, la probabilité de pouvoir tirer le maximum de bénéfice de la technologie non carbonée, plus particulièrement associée à des niveaux d'abattements significatifs, décroît avec l'ampleur des dommages considérés. La politique technologique s'oriente dans ce cas vers le soutien aux technologies carbonées avec une politique de R&D orientée vers l'amélioration incrémentale des procédés existants.

Ainsi, une des conclusions du modèle est que l'argument de la R&D comme couverture contre l'incertitude semble être validé si le problème climatique est perçu comme une probabilité de plus en plus élevée de dommages nécessitant un niveau d'abattement significatif. Si le

---

<sup>6</sup> DICE est un modèle de croissance endogène étendue pour intégrer les interactions entre les activités économiques et le climat. L'impact sur le bien être global est capturé comme une translation des augmentations de la température climatique sur la baisse des activités de production.

problème est perçu comme étant celui de dommages croissants avec des probabilités décroissantes d'occurrences alors la réponse optimale consiste à réduire les dépenses de R&D sur les deux technologies.

La comparaison entre les différentes technologies est poursuivie par Baker et Shittu (2006) et Shittu et Baker (2009) en adoptant le point de vue d'une firme pour étudier l'impact de *l'incertitude de la taxe carbone* sur les stratégies de R&D. Ces travaux tiennent compte de l'influence du *degré de flexibilité de l'appareil productif* sur les stratégies de R&D en présence d'une politique environnementale. Ils montrent que l'impact de la taxe carbone sur l'effort de R&D dépend de manière critique de la flexibilité de la firme à pouvoir substituer entre énergies carbonée et non-carbonée dans sa fonction de production. Notamment, les rigidités inhérentes à la durée des installations et les investissements déjà effectués dans l'une ou l'autre des énergies affectent l'élasticité de substitution entre les énergies.

A l'instar du modèle précédent, Baker et Shittu (2006) considèrent la décision d'allocation des investissements entre un projet de R&D sur l'énergie non carbonée (RTA) et un projet de R&D sur l'énergie carbonée (RTC). Les auteurs montrent que l'effort pour la RTA augmente de façon monotone avec la taxe carbone si la firme est suffisamment flexible. La possibilité de substituer l'énergie carbonée par l'énergie non carbonée conduit à intensifier le niveau de R&D afin de répondre à une augmentation de la taxe. En revanche, si la flexibilité est faible, la RTA baisse et la firme procède dans ce cas à une baisse de son niveau de production pour réduire ses émissions face à une montée de la taxe carbone. Dans le cas de la RTC, si la firme est suffisamment flexible, la R&D n'augmente pas de manière monotone avec la taxe carbone mais décroît à partir d'une taxe suffisamment élevée. Par ailleurs, plus la firme est flexible plus le niveau de la taxe carbone, à partir de laquelle la RTC est réduite, devient faible.

De même que dans le modèle précédant, deux perceptions possibles sont envisagés sur l'incertitude, cette fois-ci sur la taxe carbone. Si une incertitude plus élevée est perçue comme une probabilité plus importante que la taxe carbone soit élevée alors la RTA augmente avec le risque si la firme est suffisamment flexible. Dans le cas où l'augmentation de l'incertitude est perçue comme la possibilité d'avoir une taxe croissante avec une probabilité décroissante (menace d'une taxe élevée à faible probabilité) alors la RTA diminue avec l'incertitude même pour une firme flexible. Lorsque la firme n'est pas suffisamment flexible, la RTA baisse toujours avec l'augmentation de l'incertitude, quelque soit la perception de l'incertitude. Pour la RTC, dans la mesure où celle-ci est faible à la fois pour des taxes faibles et élevées, les résultats suggèrent que quelque soit le profil d'incertitude considéré l'investissement est atténué avec le degré de risque de la taxe. Une implication politique est que le maintien de l'incertitude affaiblit l'investissement privé en R&D et ce quelque soit la technologie surtout lorsqu'à une taxe élevée est associée à une faible probabilité. Pour le décideur public, cela implique de ne pas stigmatiser les événements extrêmes mais de favoriser une vision plus équilibrée sur les différents scénarios politiques possibles.

Shittu et Baker (2009) considèrent les quatre programmes de R&D indiqués ci-dessus simultanément. Pour une firme flexible, ils montrent que l'investissement total en R&D augmente d'abord, puis diminue et enfin se stabilise au fur et à mesure que la taxe croît. Lorsque cette dernière est modeste, l'allocation optimale se traduit par une augmentation du niveau de R&D sur tous les programmes. Dans le cas des programmes sur les énergies carbonées (RTC et efficacité des énergies fossiles), la R&D augmente tant que le coût de l'énergie carbonée reste moins élevé que celui de l'énergie non carbonée. Toutefois, ces deux programmes voient leur niveau baisser lorsque la taxe dépasse un certain seuil. La R&D sur

l'efficacité énergétique reste elle toujours relativement élevée dans la mesure où ce programme affecte le prix de l'ensemble des énergies. Quant au programme sur l'énergie non carbonée, il reste relativement important et se stabilise pour des niveaux élevés de taxe en raison de l'effet de substitution (flexibilité) entre les énergies carbonées et non carbonées. La stabilisation du niveau d'investissement à partir d'un certain niveau de la taxe s'explique par le fait qu'une fois que l'énergie carbonée a été complètement substituée, la taxe n'a plus d'influence sur la décision de la firme. De manière générale, la R&D s'avère la plus élevée lorsque la taxe est telle que tout en étant suffisamment élevée, elle n'incite pas les firmes à délaisser les énergies fossiles.

Pour une firme peu flexible, l'investissement total en R&D augmente de manière monotone avec la taxe mais reste beaucoup plus faible que dans le cas d'un système productif flexible. L'effort d'innovation sur l'énergie non carbonée est dans ce cas peu réactif aux variations de la taxe dans la mesure où la firme procède à une baisse de son niveau de production plutôt qu'à la substitution entre énergies carbonée et non carbonée. Les deux programmes sur les énergies fossiles continuent de manière modeste de bénéficier de financement de R&D pour des niveaux élevés de taxe. En revanche, la R&D sur l'efficacité énergétique est d'autant plus privilégiée que la firme ne peut procéder à des substitutions entre énergies. Les auteurs montrent ainsi que la R&D pour améliorer l'efficacité énergétique constitue une solution prioritaire en l'absence de flexibilité.

Il est par ailleurs montré que l'incertitude croissante de la taxe a un impact dépressif sur l'investissement total plus particulièrement lorsque la firme est flexible. La R&D sur les énergies non carbonées est le seul qui voit son niveau augmenter avec l'incertitude (jouant le rôle de couverture), tandis que la baisse la plus importante concerne la RTC. Le modèle suggère ainsi que lorsque la firme est flexible l'incertitude politique provoque un impact dépressif sur l'investissement global et sur la diversification du portefeuille. En revanche, lorsque la flexibilité est limitée, l'incertitude a peu d'impact à la fois sur le niveau de R&D et la composition du portefeuille dans la mesure où la firme est d'emblée confinée à une certaine composition de portefeuille.

Ces contributions montrent que les politiques et stratégies de R&D dépendent de manière cruciale des caractéristiques technologiques et de la perception qu'ont les acteurs de l'incertitude. En effet, le soutien à l'innovation sur les différentes filières de production d'énergie dépend de la perception qu'a notamment le décideur public de l'incertitude. Cette perception influence également les stratégies d'investissement des firmes surtout lorsque celles-ci opèrent dans le cadre d'un système productif flexible leur conférant dans la composition de leur portefeuille de R&D plus de marge de manœuvre.

### **C. Allocation des efforts de R&D et incertitude technologique**

Tandis que les modèles présentés dans la Section B envisagent l'allocation des investissements de R&D entre différentes technologies en présence d'incertitude sur les dommages ou la politique environnementale, nous nous intéressons dans les sections C, D et E aux contributions qui prennent plus explicitement en compte l'incertitude technologique dans l'allocation des efforts d'innovation.

Blanford et Clarke (2003) et Blanford (2009) examinent le portefeuille optimal de R&D et ses propriétés en termes de diversification en présence d'une double incertitude à la fois *technologique* et *climatique*.

**Blanford et Clarke (2003)** développent un modèle de R&D incertain où la variable de décision porte sur le niveau d'investissement alloué à différents projets de R&D et où les résultats possibles du processus de R&D sont appréciés par une fonction d'utilité espérée.

En considérant deux périodes le modèle tient compte de la résolution dynamique de l'incertitude et du changement dans le temps de l'allocation optimale de R&D en réponse à de nouvelles informations. Deux projets de R&D technologiques sont considérés : (P1) un programme sur la séquestration du carbone pour résoudre l'incertitude sur sa viabilité et permettant de recourir aux énergies carbonées et ; (P2) un programme pour améliorer le coût et la performance des énergies renouvelables non carbonées. Le résultat du programme P1 peut être un échec ou un succès (résolution ou non de l'incertitude). En cas de succès, le résultat peut être positif (la séquestration s'avère économiquement attractive) ou négatif (séquestration non viable). Le résultat du programme P2 est binaire (innovation avec rupture ou échec). Il est supposé que deux innovations successives issues du programme P2 conduit à une situation identique à la résolution positive de l'incertitude dans le cadre du programme P1. Autrement dit les renouvelables sont dans ce cas considérés comme économiquement attractifs pour réduire les émissions.

La probabilité d'innovation pour chaque programme  $i$  dépend de l'effort de R&D et d'un paramètre  $\rho_i$  qui représente la probabilité maximale d'innovation si tout le budget lui est alloué.

En combinant les résultats des deux projets de R&D sur les deux périodes les auteurs distinguent 3 trajectoires technologiques : (T1) Trajectoire optimiste où il existe au moins une option économiquement attractive pour réduire les émissions ; (T2) Trajectoire modeste caractérisée par des avancées limitées dans les renouvelables, accompagné par soit un échec lié à la résolution de l'incertitude sur la viabilité de la séquestration, soit une résolution négative (séquestration non viable) et ; (T3) Trajectoire pessimiste caractérisée par l'absence d'une technologie attractive pour résoudre le problème des émissions.

L'appréciation de chaque trajectoire ne dépend pas seulement des caractéristiques technologiques mais aussi des scénarii de dommages climatiques qui risquent de se réaliser. Ces dommages sont intégrés dans le modèle comme une incertitude exogène qui influence l'évaluation des trajectoires.

Ce modèle est utilisé pour examiner la dynamique de spécialisation/diversification du portefeuille. Il est par exemple montré que même lorsque  $\rho_{seq} = 1$ , tant que l'incertitude sur la séquestration n'est pas résolue, il s'avère optimal d'investir dans les renouvelables pourvu que  $\rho_{rnw} > 0$ . Ainsi, pour toutes les valeurs non-extrêmes des paramètres, une certaine diversification s'avère toujours optimale et les deux programmes bénéficient d'investissements positifs. Ceci montre également qu'il n'est jamais dans l'intérêt du décideur de reporter les investissements au sens d'une absence totale de R&D durant la première période (à court terme) tant qu'il existe une incertitude sur le succès de l'un des programmes. Cet effet est d'autant plus prononcé lorsque l'incertitude climatique est prise en considération. Plus spécifiquement l'introduction de l'incertitude climatique (par comparaison au scénario prévisible) conduit à une baisse de l'effort de R&D sur la séquestration sur les deux périodes

et à une augmentation de la R&D sur les renouvelables. Ce résultat s'explique par la baisse dramatique de l'utilité dans le cas d'un scénario de dommage sévère et par le fait que l'investissement dans le programme renouvelable par opposition au programme sur la séquestration permet de réaliser la trajectoire T2 caractérisé par des progrès technologiques modestes.

A travers un modèle plus riche à la fois du point de vue technologique et des paramètres structurant la probabilité d'innovation du programme de R&D, **Blanford (2009)** fournit également plusieurs résultats intéressants relatifs à l'allocation des efforts de R&D. L'auteur retient trois filières technologiques : les énergies fossiles (possibilité d'amélioration de leur efficacité), les énergies renouvelables et la séquestration du carbone. Pour chaque filière deux trajectoires sont considérées : une trajectoire optimiste qui suppose un succès accéléré du programme de R&D et une trajectoire pessimiste qui bénéficie des mêmes améliorations que la trajectoire optimiste mais avec un décalage temporel.

Parallèlement plusieurs scénarios possibles de politique climatique en termes de concentration des émissions sont envisagés : un scénario de référence sans contrainte sur les émissions et deux scénarii correspondant à des contraintes de stabilisation de la concentration atmosphérique du CO<sub>2</sub> de 450 ppmv et 550 ppmv respectivement.

Le modèle comporte deux composants. Dans un premier temps, l'auteur utilise un modèle d'équilibre général inter-temporel (MERGE) pour estimer la "valeur sociale" des trois politiques climatiques en cas de succès de la R&D pour chacune des technologies. Cette "valeur sociale" sert à caractériser la "demande" pour la technologie sous différents régimes de politique climatique. Dans un deuxième temps, l'aspect "offre" est considéré à travers la relation incertaine entre la R&D et l'innovation technologique. Ainsi, le portefeuille socialement optimal de R&D est déterminé *via* la relation, pour chaque technologie, entre la probabilité d'innovation, qui dépend de l'effort de R&D, et qui est supposée avoir des rendements décroissants à l'échelle, et la valeur sociale espérée de l'innovation.

La comparaison entre les programmes de R&D est effectuée en utilisant des fonctions d'innovation (probabilité d'innovation) identiques pour toutes les technologies. La différenciation se fait par conséquent uniquement suivant les croyances du décideur sur la politique climatique et la valeur sociale de chaque technologie.

Dans un premier temps il est supposé qu'une politique climatique est prévue mais que les deux contraintes de concentration du CO<sub>2</sub> sont perçues comme équiprobables. En supposant également l'indépendance entre les programmes de R&D, l'auteur examine d'abord le portefeuille de R&D optimal. Il est montré que dans un contexte technologique favorable (correspondant à un processus de R&D à faible coût et avec un potentiel de succès élevé) la dépense optimale sur chaque programme est environ la même (portefeuille équitement diversifié). Dans un contexte technologique moyennement favorable, le processus de R&D est plus difficile et requiert davantage de financement. La valeur sociale espérée de l'innovation reste cependant suffisamment élevée pour justifier des investissements plus élevés que dans le contexte favorable même si cette augmentation ne se fait pas cette fois-ci de manière proportionnelle entre les différents projets. Dans un contexte technologique difficile, le processus de R&D s'avère suffisamment coûteux pour omettre les énergies renouvelables du portefeuille et se focaliser presque exclusivement sur l'amélioration de l'efficacité des énergies fossiles tout en investissant de manière marginale sur la séquestration du carbone.

En retenant comme référence le contexte technologique moyennement favorable, l'auteur examine ensuite les effets de portefeuille via les interdépendances entre les projets de R&D. Celles-ci tiennent compte des interactions de marché où le succès d'un programme affecte la valeur du succès des autres<sup>7</sup>. Il est montré que la menace de concurrence sur les énergies renouvelables s'avère suffisante pour faire baisser de manière sensible la R&D qui leur est consacrée. En revanche, les effets de concurrence entre les technologies fossiles (efficacité énergétique et séquestration du carbone) sont compensés par leur lien de complémentarité.

L'auteur examine également le portefeuille de R&D socialement optimal suivant les anticipations sur la politique climatique. En l'absence de politique, la R&D est presque entièrement consacrée aux énergies fossiles. Seule, une part faible de la R&D est dédiée aux énergies renouvelables par les acteurs privés en l'absence d'internalisation des externalités environnementales. Lorsque cependant la possibilité d'une politique sévère de stabilisation devient plus plausible, le portefeuille de R&D converge vers une structure plus diversifiée : il inclut la séquestration de carbone, la R&D sur l'efficacité des technologies fossiles voit sa part diminuer et les énergies renouvelables gagnent en importance.

En dernière analyse, l'auteur considère l'effet de la contrainte budgétaire sur le portefeuille de R&D. Au fur et à mesure que le budget devient plus contraignant le portefeuille devient moins diversifié. Cette propriété est attribuée aux rendements décroissants à l'échelle de la R&D induisant *une échelle de priorité* entre les programmes de R&D reposant sur un processus de diversification séquentielle du portefeuille.

Goeschl et Perino (2007) adoptent une approche originale pour étudier l'impact de l'*incertitude technologique* sur la dynamique de R&D. Leur modèle suppose une incertitude sur les résultats des programmes de R&D. A chaque fois qu'un programme de R&D est lancé, une nouvelle technologie est créée. Ils considèrent cependant que la R&D peut donner lieu à une technologie qui n'est pas forcément propre mais se caractérise par une pollution différente de celle des technologies déjà existantes (notamment l'énergie nucléaire). La diversification des pollutions est supposée bénéfique dans la mesure où initialement chaque technologie est caractérisée par un stock de pollution nul et qu'au fur et à mesure du nombre de technologies découvertes la production et donc la pollution est partagée entre les différentes technologies. Il est montré que l'incertitude technologique influence à la fois la temporalité des séquences de R&D et la taille optimale du portefeuille technologique. Moins la découverte d'une *technologie propre* s'avère probable et plus la R&D est reportée, moins elle est fréquente, plus la taille optimale du portefeuille technologique se rétrécit et plus le stock de pollution avant le lancement d'un nouveau programme de R&D devient élevé à l'équilibre. Essentiellement, le modèle rend compte de l'effet stochastique de la R&D sur le coût d'abattement où les technologies de type *boomerang* peuvent être interprétées comme des succès intermédiaires dans la mesure où elles permettent de réduire le coût global d'abattement mais pas autant que la technologie *propre*.

Bien que dans une logique différente, Löschel et Otto (2009) abordent également à travers un modèle de croissance endogène le rôle de l'*incertitude technologique* dans la structuration du portefeuille technologique en présence d'une contrainte climatique. Dans leur travail l'incertitude technologique ne porte pas sur le processus même de R&D. Cette incertitude concerne la capacité des agents économiques à anticiper ou non l'arrivée d'une technologie de rupture qui dans leur cas concerne la séquestration et le stockage du carbone (CSC). En cas

---

<sup>7</sup> Les effets de portefeuille liés aux externalités technologiques entre les programmes (lorsque l'investissement dans un programme affecte la probabilité de succès de l'autre) ne sont pas considérés par le modèle.

de non anticipation, les agents n'effectuent pas de R&D pour développer la SCS avant son arrivée. La date d'arrivée de la technologie est conditionnée par le comportement des agents qui anticipent la SCS. En plus de la séquestration, le modèle considère d'autres options d'abattement pour répondre à une politique de contrainte d'émission du CO<sub>2</sub> : une baisse d'utilisation de l'énergie, un déplacement vers des énergies autres que fossiles, une amélioration de l'efficacité des processus de production.

Le modèle montre que suivant que les agents anticipent ou non l'arrivée de la rupture technologique, leurs stratégies de R&D ne sont pas les mêmes et induisent différents niveaux de bien être associé à la politique climatique. Il est notamment suggéré que l'information a une valeur négative au sens où la perte de bien être associée à la contrainte climatique est plus faible lorsque la SCS n'est pas anticipée. Comme dans ce dernier cas la SCS ne peut constituer avant son arrivée une option d'avenir pour réduire les émissions et que le prix implicite du CO<sub>2</sub> est relativement plus élevé avant son apparition (surtout dans les secteurs intensifs en carbone) les agents sont incités à investir davantage sur un ensemble plus large d'opportunités de changement techniques (notamment dans les secteurs non intensifs en carbone comme les énergies renouvelables). Ces investissements favorisent des externalités positives de connaissances (retombées technologiques) et permettent d'atteindre un état stationnaire plus élevé. Ainsi, l'incertitude et la prudence qui en résulte conduisent à un portefeuille de R&D plus diversifié au niveau de l'ensemble de l'économie.

#### **D. Choix entre projets de R&D risqués et non risqués**

Certaines contributions se sont plus particulièrement intéressées à l'allocation des efforts de R&D entre plusieurs technologies lorsque celles-ci se caractérisent par différents niveaux d'incertitudes. De manière générale ces contributions se focalisent sur les conditions sous lesquelles les acteurs effectuent un choix entre des projets peu risqués permettant des améliorations incrémentales et des projets à haut risque possédant cependant un fort potentiel de rupture.

**Bosetti et Tavoni (2009)** développent un cadre analytique et utilisent un modèle de croissance intégrant le secteur de l'énergie (WITCH, *World Induced Technical Change Hybrid model*) pour étudier, d'un point de vue social, le choix optimal entre un projet de R&D déterministe et un projet où *l'efficacité du processus de R&D est incertaine* en présence d'une *contrainte d'abattement*. Il est supposé que le décideur a le choix pour l'abattement entre deux technologies non carbonées, l'une standard et l'autre de rupture. Le coût d'abattement avec la technologie de rupture est initialement plus élevé que celui de la technologie standard mais peut être réduit *via* des efforts d'innovation. Dans le cadre d'un processus à deux périodes, il est supposé que la première période est consacrée à la R&D sur la technologie de rupture et que le décideur a le choix entre deux projets de R&D, risqué et non risqué. Durant la seconde période, une fois que le résultat du processus de R&D est révélé, le décideur choisit une combinaison des deux technologies non-carbonées pour satisfaire l'objectif d'abattement.

Le projet de R&D déterministe conduit à une réduction "moyenne" du coût d'abattement. Pour le projet risqué, l'effort de R&D peut aboutir à une réduction "moyenne" du coût d'abattement mais il peut aussi en résulter un échec (aucune amélioration des coûts) ou un succès "plus qu'espéré" (coût inférieur à la "moyenne"). Les auteurs montrent qu'en termes de coût d'abattement espéré la poursuite d'un projet risqué est préférable à un projet certain

lorsque le décideur peut toujours utiliser la technologie standard comme solution de repli pour réaliser l'abattement en cas d'échec du projet risqué et ce que quel que soit le niveau d'abattement requis. Par ailleurs, le choix d'un projet risqué conduit toujours à des efforts de R&D plus élevés que dans le cas certain. Ce résultat s'explique par l'asymétrie des gains dans le cas du programme risqué où le résultat plus qu'espéré du succès l'emporte sur la perte liée à l'échec en raison de l'existence d'une solution de repli.

**Baker et Adu-Bonnah (2008)** combinent *l'incertitude sur les dommages climatiques* et *l'incertitude technologique* pour examiner dans le cadre d'un modèle de croissance (DICE), l'impact de leur interaction sur la R&D socialement optimale dans le cas d'une technologie carbonée (RTC) et d'une technologie non carbonée (RTA).

L'incertitude du processus de R&D est modélisée en différenciant les projets suivant leur degré de risque en termes de résultats. L'incertitude est endogène au sens où la R&D influence la probabilité des résultats du changement technique. Dans le cas de la RTA, une rupture représente des améliorations majeures permettant aux énergies non-carbonées d'être compétitives avec l'énergie carbonée. Pour la RTC, une rupture peut correspondre à la mise en place de procédés de séquestration et de stockage du carbone permettant de réduire sans coût les émissions des énergies fossiles à zéro.

Les auteurs montrent que lorsque la probabilité d'une catastrophe climatique est perçue comme faible/modérée, l'investissement socialement optimal dans les énergies de type RTA augmente avec le degré de risque du projet de R&D. Les résultats sont inversés lorsque la probabilité d'une catastrophe est perçue comme très élevée. Ce résultat s'explique par le fait que si les dommages sont perçus comme pouvant être faibles/modestes, la seule possibilité pour la RTA de percer est une rupture. Dans ce cas les avantages du projet risqué (possibilité de rupture) l'emportent sur ses inconvénients (si le projet échoue, la société est privée des améliorations incrémentales qu'auraient pu être obtenues avec le projet certain). En revanche, lorsque les dommages sont perçus comme pouvant être sévères, toute amélioration même incrémentale devient bénéfique et suffit à rendre ces technologies compétitives. La prise de risque devient alors moins attractive. Ce résultat suggère ainsi que les technologies non carbonées ne seront dominantes que si un événement extrême se produit (une rupture technologique ou une catastrophe climatique). Pour la RTC les résultats sont inversés. Par exemple, lorsque les dommages sont perçus comme pouvant être catastrophique, le seul moyen de maintenir ces technologies sur le marché consiste à soutenir la rupture technologique, ce qui rend la poursuite de projets risqués sur ces technologies plus attractive. Ce résultat est quelque peu différent de celui obtenu par Bosetti et Tavoni (2009) qui montre que quel que soit l'objectif d'abattement, l'investissement socialement optimal dans les technologies non carbonées est toujours plus élevé pour les projets risqués que les projets non risqués en raison notamment d'une solution de repli.

Les auteurs concluent que si la probabilité d'une catastrophe est perçue comme faible, le rôle de la politique technologique devrait être de soutenir des projets de R&D plus risqués dans le domaine des énergies non carbonées. En revanche, si la probabilité d'une catastrophe est perçue comme élevée, les gouvernements pourraient avoir pour rôle de soutenir des projets plus risqués dans le domaine des énergies carbonées.

## E. Instruments politiques et choix technologiques

Cette dernière section aborde les travaux qui envisagent la façon dont les différents instruments de politiques environnementales conditionnent les choix et la diversité technologique.

Krysiak (2008) comparent trois types d'instruments : **standard d'émission** (instrument de contrôle-commande), **permis d'émission échangeables** et la **taxe**. Le modèle suppose une incertitude sur le coût d'abattement. Bien que la firme connaisse ce coût à court terme, l'incertitude porte sur son évolution à long terme. L'analyse porte sur la régulation à long terme des firmes, horizon durant lequel elles peuvent influencer sur leur coût d'abattement à court terme en investissant dans une nouvelle technologie. Le choix technologique à long terme porte sur la forme de la fonction de coût marginal (coefficients  $c'$  et  $c''$ ). Par exemple, une technologie de séquestration et de stockage du carbone (SSC) permet une plus grande flexibilité à court terme des niveaux d'abattement du  $\text{CO}_2$  que la substitution entre carburants (transition du charbon au gaz naturel), mais les premières unités d'abattement peuvent être plus coûteuses. Ainsi la SSC peut se traduire par un  $c'$  élevé et un  $c''$  faible. Par ailleurs, les deux technologies peuvent différer en termes aussi de coût d'investissement.

Les différents instruments diffèrent quant aux risques qu'ils imposent aux firmes. Pour la taxe il existe un risque de coût lié à la technologie d'abattement à long terme mais les firmes ont la possibilité en toute liberté d'ajuster leur production et donc leur niveau d'abattement. Pour le standard d'émission il existe toujours un risque de coût sans cependant la possibilité d'ajustement par les quantités. Pour les permis échangeables les firmes peuvent toujours ajuster leur production mais il existe un risque lié à la fois au coût et au prix sur le marché des permis. La stratégie d'assurance contre ces risques passe pour les firmes par le choix de leur technologie.

En effet, les quantités optimales produites sous chacun des instruments montrent que dans le cas de la taxe et des permis échangeables la production dépend de l'élément stochastique. La présence de cet élément indique la valeur marginale pour les firmes de pouvoir ajuster la quantité produite aux changements des coûts aléatoires. Cet élément diffère cependant entre les deux instruments car pour les permis échangeables la firme s'ajuste non seulement aux changements de coûts mais aussi aux changements corrélés du prix des permis. Cet élément stochastique est toutefois absent dans la détermination de la production optimale pour le standard car l'ajustement est dans ce cas impossible. Le modèle permet ainsi de suggérer que les trois instruments politiques induisent chacun différentes décisions technologiques en raison des risques différents que ses instruments font supporter à la firme.

Il est notamment montré que la taxe conduit à l'adoption d'une technologie plus flexible, c'est à dire à une fonction de coût marginal ayant une pente plus faible ( $c''$  faible), que les permis échangeables qui eux mêmes conduisent à l'adoption d'une technologie au moins aussi flexible que le standard d'émission pour lequel l'ajustement est impossible. La flexibilité donne à la firme plus de liberté pour ajuster son abattement en fonction des changements de coûts. La valeur de cette flexibilité dépend par ailleurs de la corrélation de l'élément stochastiques des coûts entre les firmes. Plus les coûts sont corrélés, plus le mouvement de prix des permis est corrélé avec les coûts, ce qui atténue l'ajustement des quantités de la part des firmes. Ainsi la flexibilité a le plus de valeur pour les firmes lorsque la taxe est utilisée car dans ce cas la taxe étant constante elle n'est pas corrélée avec les coûts (contrairement au prix

des permis). En revanche la flexibilité n'a pas de valeur lorsque la corrélation prix-coût est parfaite (cas des permis) ou que l'ajustement n'est pas possible (standard d'émission). Le modèle montre ainsi que les instruments politiques influence la valeur de la flexibilité pour les firmes et impliquent de ce fait l'adoption de technologies plus ou moins flexibles. On peut s'attendre ainsi à ce qu'une taxe incite davantage les firmes à utiliser des technologies flexibles telles que la SSC et à moins investir par exemple dans l'énergie solaire qu'un standard de performance.

L'auteur étudie également la manière dont les trois instruments affecte le bien être social lorsque le choix technologique est endogène. Il est montré que dans les cas où le régulateur utilise le standard, les firmes choisissent toujours la technologie socialement optimale étant donné le niveau d'abattement fixé par le régulateur. Ceci n'est plus le cas pour la taxe et les permis où la décision technologique de la firme est toujours socialement sous-optimale tant que le bénéfice marginal de l'abattement n'est pas uniforme. Ce résultat s'explique par l'amplification des fluctuations des abattements dans le cas d'une régulation par la taxe et les permis qui incitent les firmes à choisir une technologie trop flexible pour pouvoir garantir le niveau d'abattement agrégé socialement optimal. En raison des coûts sociaux générés par la volatilité et la flexibilité, en présence d'une trop grande incertitude sur les coûts d'abattement, le standard d'émission s'avère préférable à la taxe et aux permis.

Dans un modèle récent Krysiak (2011) étudie les mêmes instruments suivant leur capacité à inciter le secteur privé à maintenir la diversité technologique et à engager des efforts de R&D sur la technologie ayant le meilleur potentiel à long terme plutôt que d'améliorer celle dont les coûts sont les plus faibles à court terme.

Le modèle sépare le secteur de R&D du secteur de production polluante. Dans le secteur amont il existe deux firmes concurrentes, chacune développant une technologie différente (une technologie propre et une technologie émettrice, la première étant plus coûteuse que la seconde). Les décisions de R&D dépendent des décisions d'adoption du secteur aval, qui elles mêmes dépendent des politiques environnementales. L'amélioration technologique réduit le coût marginal de production mais n'affecte pas l'émission unitaire des technologies. Les deux technologies peuvent être vendues à des prix différents dans la mesure où elles possèdent différentes qualités et peuvent par conséquent être développées simultanément (concurrence à la Bertrand avec produits différenciés). En revanche, en l'absence de diversité technologique, le gagnant remporte tout le marché (concurrence à la Bertrand avec produit homogène). Ainsi le type de concurrence dans le secteur de R&D dépend du type de politique environnementale qui influence le sentier d'adoption et de développement technologique. Le processus de R&D est supposé certain au sens où à chaque étape l'effort de R&D technologique contribue sans ambiguïté à une baisse des coûts des technologies développées.

Les décisions d'adoption technologique se font cependant en présence d'incertitude sur les prix (coûts) des facteurs de production qui affectent les différentes technologies sur toute leur durée de vie. Par ailleurs ces incertitudes ne se reflètent pas dans le mouvement des prix du produit final dans la mesure où la capacité de production est fixée *ex ante* une fois pour toute et que les coûts d'investissement en capital sont irréversibles.

Il est montré que le choix de l'instrument politique a une influence critique sur la diversité technologique. En effet les différents instruments conduisent dans le secteur aval à différentes configurations d'allocation des risques qui elles mêmes induisent différentes décisions d'adoption technologique qui elles mêmes influencent la structure de la concurrence

technologique en amont en termes de R&D. La taxe et le standard conduisent à l'adoption par toutes les firmes en aval de la technologie ayant le coût le plus faible. Cette absence de diversité technologique en aval conduit à un verrouillage technologique dans la mesure où tout le processus de R&D se concentre sur une seule filière qui se développe très rapidement sans laisser la chance à la filière alternative de réaliser son potentiel. Ce résultat s'explique par le fait que la taxe et le standard n'incitent pas les entreprises à se prémunir contre l'incertitude des coûts affectant le prix des facteurs *via* la diversification technologique. En effet, dans le cas d'un standard d'émission les firmes doivent respecter le standard imposé de manière exogène indépendamment des coûts qu'elles supportent. Elles choisissent par conséquent la technologie qui leur assure le profit espéré le plus élevé étant donné le standard. Dans le cas de la taxe, les firmes peuvent ajuster leur effort d'abattement à leur coût. Mais l'incitation à l'abattement est aussi donnée de manière exogène et est indépendante de la réalisation du prix des facteurs de production. Ainsi il n'y a aucun avantage à utiliser une technologie différente de celle dont le coût total est le plus faible.

La conséquence sur le marché de R&D est qu'avec la taxe et le standard seules les firmes engagées dans la technologie la moins coûteuse initialement effectuent de la R&D et produisent à l'équilibre, indépendamment du potentiel à long terme de la technologie alternative, provoquant ainsi un verrouillage technologique.

Par ailleurs, lorsqu'une seule technologie est développée les efforts de R&D ne dépendent plus de la sévérité de la politique environnementale. Dans la mesure où toutes les firmes adoptent la même technologie, la demande reste constante. Bien qu'une taxe ou un standard plus sévère rende la technologie propre plus attractive, une fois que le seuil d'adoption a été franchi une plus grande sévérité n'influence plus l'effort de R&D.

En revanche dans le cas des permis, l'incertitude induit une diversité en termes d'adoption technologique et favorise le développement simultané de différentes technologies. Cette diversité augmente la possibilité que la technologie dont le potentiel à plus long terme est plus élevé soit maintenue sur le marché.

Cette diversité s'explique par le fait qu'elle permet aux entreprises ayant adopté une technologie alternative de bénéficier de la couverture offerte par le marché des permis contre l'incertitude des prix des facteurs de production. En effet, le prix d'équilibre sur le marché des permis varie suivant la réalisation des chocs sur les prix des facteurs de production. Si toutes les firmes utilisent la même technologie, elles font toutes faces aux mêmes chocs et le prix des permis est parfaitement corrélé avec ces chocs. Le marché des permis ne fournit donc pas dans cas de couverture dans la mesure où les chocs sont identiques pour toutes les firmes. En revanche si quelques firmes investissent dans la technologie alternative, elles font face à différents chocs qui ne sont pas parfaitement corrélés avec le prix des permis. En utilisant une technologie différente de celle de la majorité des firmes, ces firmes parviennent à s'assurer contre les chocs de prix à travers l'échange de permis. Il existe ainsi un équilibre où les deux technologies parviennent à coexister, même lorsque leurs coûts d'utilisation diffèrent.

Cette diversité technologique en aval conduit à une concurrence à la Bertrand en amont avec des technologies différenciées et un développement parallèle si les écarts de coûts des différentes options ne sont pas très significatifs pour pouvoir être vendues en présence d'un marché de permis d'émission à des prix différents. Dans ce cadre si la technologie alternative n'est pas significativement désavantagée initialement elle peut réaliser son potentiel de long terme.

Par ailleurs, le nombre de permis sur le marché (sévérité de la politique environnementale) a un effet sur la dynamique de développement de la technologie alternative. Si les permis sont généreusement distribués alors la technologie la moins coûteuse initialement maintient toujours une part de marché à moins que le potentiel à long terme de la technologie alternative soit substantiel. En présence d'une politique sévère, seule la technologie alternative est adoptée à long terme une fois le processus de R&D déclenché. Toutefois le développement de la diversité technologique avec les permis se fait au prix d'une réduction de la vitesse de développement. Lorsque les deux technologies sont développées, le rendement des efforts de R&D pour chacune des technologies devient plus faible. Dans la mesure où les coûts de R&D sont croissants et strictement convexes avec l'effort de R&D, le niveau optimal d'effort s'en trouve réduit.

### **3. L'hypothèse de Porter : innovation environnementale et les déterminants internes aux firmes**

Ce chapitre passe en revue la littérature théorique motivée par l'hypothèse de Porter concernant l'impact de la réglementation environnementale sur l'innovation et la compétitivité des entreprises. Cette hypothèse a été à la source d'une abondante littérature sur les fondements théoriques susceptibles de la valider. Ces travaux portent sur le rôle joué par les défaillances de marchés, l'organisation des firmes et l'incertitude durant le processus de R&D et d'innovation pour confirmer ou infirmer la relation positive entre politique environnementale, effort d'innovation des firmes et l'impact sur leur profitabilité. Notre revue de la littérature privilégie les contributions considérant plus explicitement le rôle de l'incertitude et de l'organisation interne des firmes dans l'analyse de l'hypothèse de Porter.

Nous présentons tout d'abord brièvement l'hypothèse de Porter, les critiques théoriques auxquelles elle a donné lieu et les conditions nécessaires permettant de la valider (**Section A**). Nous insistons ensuite sur les liens entre l'hypothèse de Porter et l'incertitude d'une part (**Section B**) et la dimension organisationnelle des décisions de R&D environnementale d'autre part, à travers notamment le comportement des décideurs (**Section C**), les problèmes d'agence (**Section D**) et la structure de décision des firmes (**Section E**).

#### **A. L'hypothèse de Porter, ses critiques et fondements théoriques**

Les travaux de Porter (1991) et de Porter & van der Linde (1995) ont mis en avant l'hypothèse d'une relation positive entre la réglementation environnementale et le profit / la compétitivité des firmes. Suivant ces auteurs une réglementation environnementale correctement conçue peut induire les firmes non seulement à intensifier leur effort d'innovation environnementale mais peut aussi en forçant les firmes à engager cet effort, améliorer leur profit grâce à une réduction de leur coût de conformité à la contrainte environnementale à travers notamment la découverte de nouvelles opportunités technologiques, sources de gains de productivité.

L'hypothèse de Porter est fondée sur l'argument que les firmes n'exploitent pas forcément d'elles mêmes toutes les options possibles pour améliorer leur profit et ne font pas toujours les choix optimaux. La réglementation environnementale est vertueuse au sens où elle motive chez les firmes l'exploitation d'opportunités qui n'étaient pas (ou ne pouvaient l'être) perçues comme telles en l'absence de réglementation. Celle-ci contribue à surmonter les inerties organisationnelles et à installer un climat propice à l'innovation et ce faisant pousse les firmes à devenir plus efficaces en les obligeant par exemple à améliorer la gestion de leurs ressources ou à explorer de nouvelles possibilités de production. Pour Porter et Linde il est essentiel d'adopter une perspective dynamique pour saisir l'impact de la pression réglementaire dans la mesure où les coûts que celle-ci engendre initialement peuvent être plus que compensés par ses bénéfices à plus long terme.

Les principales critiques à l'égard de l'hypothèse de Porter ont été formulées par les économistes néoclassiques. En réagissant directement à l'article de Porter et van der Linde (1995), Palmer *et al.* (1995) ont montré qu'en présence de la seule externalité environnementale, même si la réglementation induit les firmes à innover, leur profit n'augmente pas pour autant. En supposant que les firmes optimisent leur décision étant donné les informations dont elles disposent, la réglementation restreint l'ensemble des choix

technologiques qui leur sont disponibles et diminue leur profit. La pression environnementale représente alors simplement une contrainte supplémentaire pour les firmes. Autrement dit, l'hypothèse de Porter constitue l'exception davantage que la règle. Elle ne peut être valable que si les firmes sont systématiquement ignorantes des nouvelles technologies profitables que la réglementation est supposée leur révéler ou qu'elles sont incapables de prendre les décisions économiquement bénéfiques par elles-mêmes. Il n'existe pas par conséquent de lien automatique positif entre réglementation et amélioration de la compétitivité. Deux questions sont alors soulevées. Tout d'abord pourquoi les firmes auraient-elles besoin de la réglementation pour entreprendre des projets d'innovation qui de toute façon leur sont profitables ? L'autre porte sur la capacité des pouvoirs publics à détecter des opportunités de profit non exploitées par les firmes, alors que celles-ci sont dans la plupart des cas mieux informées que les pouvoirs publics sur ces opportunités.

L'hypothèse « gagnant-gagnant » de Porter a donné lieu à une abondante littérature en économie pour mieux mettre en lumière ses fondements théoriques. Les travaux qui ont été développés tentent de préciser les conditions sous lesquelles l'hypothèse est susceptible d'être vérifiée. Dans la mesure où même en présence d'une externalité environnementale, les modèles néoclassiques standards ne peuvent valider une telle hypothèse, ces travaux ont introduit des hypothèses supplémentaires ou ont supposé au niveau du marché d'autres défaillances possibles.

Certains travaux ont porté leur attention sur l'argument d'imperfection des marchés de la R&D (de la connaissance) induisant un niveau socialement sous-optimal d'innovation dans les technologies environnementales. Ces imperfections sont notamment relatives aux externalités positives générés par l'apprentissage et la R&D, aux interactions stratégiques en présence de concurrence imparfaite, de problèmes de coordination, d'effets de prise d'otage et d'asymétries d'information entre producteurs et consommateurs (Simpson and Bradford, 1996 ; Xepapadeas et Zeeuw, 1999 ; Mohr, 2002 ; Hart, 2004 ; Feichtinger *et al.*, 2005 ; Grecker, 2006 ; Mohr et Saha, 2008). Ces modèles montrent que sous certaines conditions plus ou moins restrictives, ces imperfections de marché apportent un certain crédit à l'hypothèse de Porter dans la mesure où la réglementation environnementale permet de provoquer un nouvel équilibre qui tout en assurant un niveau de R&D plus élevé améliore la situation de l'ensemble des acteurs.

Ces travaux permettent de tirer deux principales conclusions. Premièrement, obtenir le résultat de Porter requiert toujours des conditions spécifiques, notamment la présence au delà de l'externalité environnementale d'une source additionnelle de distorsion (asymétrie d'information, externalité positive en R&D, pouvoir de marché). Ainsi, la réglementation environnementale devra avoir pour effet non seulement de réduire l'impact environnemental des firmes mais corriger également d'autres imperfections de marché dans un sens qui accroît le profit des entreprises réglementées. Il se peut ainsi qu'un décideur public préoccupé par la seule externalité environnementale impose des mesures réduisant le bien-être social (voir Chapitre 1 et 2). La deuxième conclusion qui découle de la première concerne le type d'intervention publique nécessaire. Dans la mesure où il existe au moins deux distorsions distinctes, il n'est pas certain que le seul recours à la réglementation environnementale puisse garantir le meilleur résultat et que suivant la spécificité des distorsions il soit préférable pour le décideur politique de recourir à des instruments différents (voir également Chapitre 1 et 2). De plus, le type d'intervention publique dans le domaine de l'environnemental susceptible d'aboutir à un effet à la Porter dépendra de la nature des distorsions qui interagissent.

Tandis que les travaux théoriques évoqués ci-dessus expliquent les conditions sous lesquelles les firmes innovantes peuvent compenser complètement le coût de conformité à la réglementation à partir de l'existence de plusieurs sources d'imperfections de marché, d'autres contributions montrent que ces sources ne sont pas l'unique justification possible de l'hypothèse de Porter. Ces analyses qui s'inscrivent dans la tradition de l'économie comportementale et de la gestion et de l'économie des organisations s'intéressent aux conditions managériales et organisationnelles de l'hypothèse de Porter. L'accent est mis sur le rôle de l'incertitude, l'aspect comportemental /cognitif durant le processus de décision, et les inefficiences / défaillances organisationnelles résultant de conflits d'intérêts, de problèmes de coordination / communication au sein des firmes.

Il est supposé que ce sont les comportements individuels et les systèmes / processus de gestion organisationnelle et collective qui les conditionnent qui déterminent la capacité des entreprises à bénéficier des politiques environnementales. Il importe en ce sens de considérer l'effet de leur mise en vigueur sur le comportement des acteurs et sur le processus de gestion des firmes. Plus proche des arguments de Porter, ces modèles s'intéressent ainsi aux dynamiques comportementales et organisationnelles et à la façon dont une pression de l'extérieur peut notamment déclencher des changements de l'intérieur dans les firmes et rompre les inerties comportementales et organisationnelles.

## **B. Incertitudes technologiques / politiques**

**Porter et van der Linde (1995)** considèrent que dans la mesure où les préoccupations environnementales ne constituent pas d'un point de vue stratégique la priorité principale des firmes, les bénéfices qu'elles sont susceptibles de générer peuvent être perçus comme très incertains et freiner les investissements. Le rôle de la réglementation environnementale est alors de réduire cette incertitude et de créer la visibilité nécessaire pour encourager les firmes à investir dans les innovations environnementales. Autrement dit, la perception de l'incertitude technologique est intimement à la politique environnementale en vigueur. L'incertitude inhérente au processus de R&D n'est cependant pas explicitement considérée.

Bien que Palmer *et al.* (1995) acceptent la possibilité, en présence d'incertitude, que les firmes manquent des opportunités profitables, cette possibilité ne change pas selon eux les critiques à l'adresse de l'hypothèse de Porter. Les résultats de R&D étant par essence incertains, il se peut que, par chance, une entreprise se trouve dotée d'une technologie qui *ex post* se révèle être rentable. Toutefois, cela n'implique pas que l'investissement dans cette technologie était profitable *ex ante* sur la base de sa rentabilité espérée. Ainsi une firme rationnelle, qui estime la valeur espérée d'un projet, peut le considérer comme uniquement rentable en présence de réglementation, pour se rendre compte après la finalisation du projet qu'il aurait aussi été rentable même sans réglementation. De même si les firmes apparaissent comme ayant manqué des opportunités à long terme en l'absence de réglementation c'est parce que celle-ci est perçue par les firmes comme étant initialement un état du monde invraisemblable. Ainsi avec le recul il est possible que le comportement des firmes puisse apparaître comme incorrect, même si leurs décisions sont *ex ante* correctes.

Deux modèles ont plus explicitement intégré le rôle de l'incertitude en lien avec l'hypothèse de Porter. Popp (2005) s'est intéressé à l'incertitude des résultats de R&D, tandis que Cadot et Sinclair-Desgagné (1995a, 1995b) ont plus particulièrement abordé le rôle que peut jouer la

perspective d'une réglementation stricte (dont la mise en vigueur est incertaine) comme menace crédible pour inciter les entreprises à innover.

**Popp (2005)** illustre à travers un modèle de simulation comment l'incertitude des revenus espérés de l'innovation découlant du caractère asymétrique de la distribution des résultats de R&D (nombre limité de succès inattendus et beaucoup d'échecs) peut conduire à compenser les coûts pour les firmes de se conformer à la réglementation environnementale et à quelle fréquence cette compensation peut avoir lieu.

Contrainte par la réglementation, la firme a le choix entre réduire l'utilisation d'un facteur de production émetteur de CO<sub>2</sub> (énergie fossile) et produire moins ou entreprendre des activités de R&D qui permettent d'utiliser une nouvelle technologie moins émettrice. La facilité de remplacement de l'énergie fossile par la nouvelle technologie dépend cependant de l'élasticité de substitution ( $\rho$ ) entre ces deux facteurs dans le processus de production (flexibilité du système productif).

La probabilité de succès de la R&D dépend d'un paramètre  $\lambda$  ( $0 < \lambda < 1$ ) qui représente "la facilité du processus de R&D". Cette probabilité augmente avec  $\lambda$  mais diminue avec l'ampleur du succès. Ainsi, les réalisations de succès avec un profit exceptionnels sont toujours rares. Les tirages où la R&D est un succès et ceux où le succès est élevé sont cependant plus plausibles avec des valeurs élevées de  $\lambda$ . Cependant les distributions de probabilité sont aussi telles qu'une bonne partie des projets de R&D sont des échecs. Par ailleurs, le niveau de succès nécessaire pour rendre la R&D profitable dépend de facteurs tels que le coût de la R&D et la rigueur de la réglementation.

Il est montré que la fréquence avec laquelle la R&D conduit à des profits plus élevés dépend de manière critique des paramètres  $\rho$  et  $\lambda$ . Une augmentation (diminution) de  $\rho$  et  $\lambda$  conduit à une augmentation (diminution) de cette fréquence. Cependant, suivant les couples de valeurs de  $\rho$  et  $\lambda$  seule une minorité de firmes dégagent des profits plus élevés. Une augmentation de la sévérité de la réglementation réduit sans ambiguïté la fréquence de profitabilité. Le coût de la R&D affecte également la fréquence des cas profitables. Pour des coûts de R&D faibles la réglementation fait diminuer la fréquence des projets profitables puisque les entreprises exploitent déjà sans réglementation une grande majorité des projets à faible coût. En revanche, lorsque le coût de R&D est élevé, la fréquence d'une réglementation bénéfique augmente. Intuitivement ce résultat révèle que l'hypothèse de Porter est moins valide pour des petits projets de R&D qui améliore le processus de production à la marge (opportunités à portée de main), sur lesquels les entreprises s'engagent d'elles mêmes, mais plutôt pour des projets de grande ampleur qui sont susceptibles de restructurer de manière significative le processus de production.

**Cadot et Sinclair-Desgagné (1995a, 1995b)** considèrent le problème d'un gouvernement souhaitant mettre en place un standard environnemental plus strict tout en étant préoccupé de son impact sur la position concurrentielle et le profit des firmes. Le processus de R&D est incertain au sens où la probabilité de son succès dépend de l'effort de la firme. La solution d'incitation retenue par le décideur public est celle d'une *menace* d'imposer un standard environnemental stricte sans pour autant indiquer la date de sa mise en application. Dans ce contexte la régulation est toujours incertaine. Le modèle montre ainsi que cette incertitude (sous la forme d'une menace crédible) peut être utilisée par le gouvernement pour inciter la firme à développer la technologie nécessaire pour respecter le nouveau standard environnemental plus stricte sans avoir à l'imposer. En effet, le schéma d'incitation est tel que

la probabilité de transition vers un régime de régulation environnementale décroît dans le temps au fur et à mesure que la firme accomplit avec succès les phases intermédiaires de son projet de R&D technologique pour respecter le standard environnemental qui risque d'être mis en place. Au fur et à mesure que le rendement privé du développement technologique augmente, la probabilité de réglementation diminue dans la mesure où la probabilité de finaliser le projet augmente même si la menace perd de sa vigueur. Par conséquent, l'inefficacité associée à une probabilité positive de réglementation devient minimale pour les meilleurs projets. Lorsque les préférences du gouvernement s'orientent vers la régulation immédiate (pression environnementale forte) la probabilité d'un développement réussi par la firme, qui dépend de son effort, augmente. En revanche lorsque les préférences du gouvernement accordent un poids excessif à la réussite technologique (en raison de préoccupations à l'égard de la rentabilité des firmes) l'effort des firmes diminue et la réussite technologique devient moins probable.

### **C. Impact des politiques environnementales sur le comportement des décideurs**

L'impact de la réglementation environnementale sur les décisions et le profit des firmes a été étudié également en fonction du comportement face à l'incertitude des acteurs économiques. Ces contributions considèrent d'une part des décideurs ayant différents comportements face au risque des projets de R&D (neutre au risque, riscophobe et riscophile). D'autre part, l'attitude face à l'incertitude est associée aux préférences temporelles de l'investisseur (notamment à travers des préférences biaisées pour le présent) dans l'évaluation des nouvelles technologies. Ces comportements ne renvoient pas en soi aux défaillances de marché mais reflètent les aspects sous-jacents aux processus de décision dans les firmes.

Kennedy (1994) s'intéresse à l'effet de la réglementation environnementale sur l'effort de R&D et la performance de la firme en fonction des différentes attitudes face au risque de son dirigeant lorsque les résultats de la R&D sont incertains. Dans un contexte où la réglementation a pour effet de diminuer la production pour un niveau donné d'intrants (une partie de ces intrants étant utilisée pour réduire les émissions), la R&D a pour objectif d'améliorer la productivité de la firme. Cependant, la réalisation de la variable aléatoire qui affecte le résultat du processus d'innovation est indépendante de l'effort de recherche. Dans la mesure où le dirigeant de l'entreprise peut avoir une attitude neutre, négative ou positive envers le risque, sa décision sur le niveau de recherche est fondée non pas sur le profit espéré mais sur l'utilité espérée qu'il retire du profit.

Lorsque le dirigeant est neutre au risque, il souhaite simplement minimiser le coût espéré de la firme. Son effort de R&D s'intensifie avec la contrainte environnementale puisque la réglementation augmente *ex ante* ce coût. En revanche, *ex post* ce coût peut diminuer ou augmenter suivant le résultat stochastique du processus d'innovation<sup>8</sup>. Dans la mesure où l'innovation dépend à la fois de l'effort et de la chance, le fait que la réduction du coût soit plus probable pour des réalisations défavorables ou favorables de l'élément stochastique dépend de ce que la chance et l'effort de recherche sont des substituts ou des compléments dans le processus d'innovation.

---

<sup>8</sup> On retrouve ici les raisonnements menés dans d'autres modèles en réaction à l'hypothèse de Porter (Popp, 2005).

Lorsqu'en revanche le dirigeant est riscophobe ou riscophile il ne minimise plus le coût espéré de la firme mais maximise l'utilité espérée qu'il retire du profit. Si par exemple il est riscophobe, il accorde plus d'importance aux risques d'échec des activités d'innovation, qu'aux possibilités de succès. Il a par conséquent une tendance à sous-investir en R&D (par rapport au niveau minimisant le coût espéré de la firme). Dans ce cas la réglementation peut inciter le dirigeant à entreprendre un niveau de R&D plus près de celui qui minimise le coût espéré *ex ante* de la firme. Cela ouvre la possibilité que le coût espéré minimum avec réglementation puisse être inférieur au coût espéré réel sans réglementation. Le facteur crucial est ici la complémentarité entre la R&D et la chance qui fait que la recherche supplémentaire suscitée par la réglementation donne un bénéfice supérieur aux bons tirages qu'aux mauvais tirages et incite le dirigeant à un niveau de R&D minimisant le coût espéré. Un raisonnement similaire s'applique au cas d'un dirigeant riscophile qui en l'absence de réglementation choisit un niveau de R&D plus élevé que celui qui minimise le coût espéré de la firme. Dans ce cas c'est lorsque l'effort de R&D et la chance sont des substituts que la réglementation induit le dirigeant à un niveau de R&D plus proche de celui minimisant le coût espéré de la firme.

Le modèle de Kennedy montre ainsi que l'absence de neutralité au risque n'est pas une condition suffisante pour que la réglementation environnementale ait un impact positif sur la firme. D'autres conditions assez spécifiques doivent également être respectées. Il faut notamment que, dans le cas de l'aversion pour le risque, la R&D engendrée par la réglementation augmente davantage les bénéfices associés aux bonnes réalisations des activités de R&D plutôt qu'aux mauvaises, contrecarrant ainsi l'impact de l'aversion pour le risque.

Le modèle de Kennedy suggère de même que dans une industrie composée d'entreprises hétérogènes (en termes de comportement face au risque), il est possible que la réglementation ait des effets distincts sur les différentes firmes selon les réactions de chacune en matière d'innovation. En particulier, il est possible que les coûts augmentent pour certaines entreprises et qu'ils diminuent pour d'autres.

En s'appuyant également sur l'économie comportementale **Ambec et Barla (2006)** considèrent l'exemple d'un dirigeant dont les préférences biaisées pour le présent le conduisent à retarder les investissements d'innovation sur des opportunités profitables à terme mais coûteuses dans l'immédiat. Les auteurs donnent l'exemple d'un manager qui peut investir un montant  $C$  à une période donnée pour engendrer des bénéfices d'un montant  $V$  à la période suivante. D'un point de vue économique l'investissement a lieu si  $C < \delta V$  avec  $\delta < 1$  représentant le facteur d'escompte du dirigeant. Cependant lorsqu'il s'agit d'arbitrer entre "aujourd'hui" et "demain" le manager utilise un facteur d'escompte différent  $\beta\delta$  avec  $\beta < 1$ . Ces préférences *beta-delta* font que le manager lorsqu'il se projette dans le future investit en réalité que sur les projets pour lesquels  $C < \beta\delta V$  et non pas  $C < \delta V$ . Autrement dit, il retarde tous les investissements pour lesquels  $\beta\delta V < C < \delta V$ . Dans leur raisonnement, la réglementation, en rendant certains investissements obligatoires ou plus profitables peut inciter le manager à surmonter son biais pour le présent et conduire ainsi à l'amélioration des profits de la firme tout en contribuant à sa performance environnementale.

**Chowdhury (2010)** propose une illustration formelle de ce résultat en présence de préférence biaisée des décideurs pour le présent (taux d'actualisation hyperbolique) pour déterminer de manière plus précise les conditions sous lesquelles l'hypothèse de Porter est susceptible d'être vérifiée. Le processus de R&D pour développer une technologie propre est supposé incertain et peut se révéler un échec ou un succès. Il est montré que pour toute probabilité de succès

positive il est possible d'imposer une taxe environnementale plus sévère en présence d'une technologie polluante qui conduit la firme à engager un investissement de R&D sur la technologie propre et qui a un impact positif sur les profits espérés à condition que le coût d'investissement en R&D soit modéré et que l'horizon temporel du dirigeant soit suffisamment long.

#### **D. Réglementation environnementale et problèmes d'agence**

Plus proche des arguments de Porter et van der Linde (1995) un certain nombre de contributions ont insisté sur les facteurs d'inefficience ou de défaillance organisationnelle internes aux firmes, les empêchant de bénéficier d'opportunités réduisant leur impact environnemental tout en améliorant leur profit.

Les modèles de principal-agent associent ces défaillances organisationnelles aux problèmes de conflits d'intérêt et d'incitation au sein des firmes. Ces contributions traitent la firme, non plus comme une entité homogène mais plutôt comme un ensemble complexe de relations (nœuds de contrats) entre des individus (par exemple manager, employés et actionnaires) dont les objectifs et les motivations ne coïncident pas nécessairement. L'apport majeur de ces modèles est de montrer que la structure de l'information au sein de la firme représente une contrainte qui peut avoir des conséquences significatives sur les décisions qui sont prises (et donc sur le profit) lorsque l'agent, à qui la prise de décision est déléguée, exploite de manière stratégique une information privée que le principal ne dispose pas. Dans la mesure où par exemple les asymétries sont génératrices de rentes pour l'agent informé, celui-ci évite de révéler des informations susceptibles de remettre en cause les avantages qu'il tire de l'organisation présente, favorisant par là l'inertie organisationnelle. Cette approche s'intéresse ainsi plus particulièrement aux mécanismes d'incitations et de contrôle pour corriger les inefficiences organisationnelles.

Le rôle de la réglementation environnementale est alors abordé comme un moyen d'influer sur les mécanismes d'incitation et de contrôle interne pratiqués par les firmes pour aller dans le sens d'une meilleure prise en compte des aspects environnementaux. Les hypothèses sont telles que la régulation tout en imposant à la firme un coût supplémentaire est susceptible de corriger les distorsions d'incitation au sein de la firme.

**Schmutzler (2001)** développe un modèle où l'inefficience organisationnelle résulte de la difficulté du dirigeant d'entreprise (principal) à inciter le manager (l'agent) à choisir les projets de R&D les plus bénéfiques à long terme pour son entreprise. Le manager a cependant la possibilité de choisir des projets qui augmentent les profits de la firme soit à court terme, soit à long terme. La spécificité des projets à long terme est qu'ils améliorent à la fois la productivité et le coût d'abattement de l'entreprise. La préférence de l'agent pour le court terme s'explique d'une part parce qu'il est supposé œuvrer avec une préférence biaisée pour le présent. D'autre part il résulte du fait que la relation causale entre l'effort qu'il engage et la performance à court terme est plus facile à établir ou à prouver que la relation entre son effort et la performance à long terme. Ainsi le manager, plus impatient, utilise un facteur d'escompte (poids accordé au futur) inférieur à celui souhaité par le chef d'entreprise.

Le résultat principal du modèle est que même en présence de problèmes d'incitation provoquant un sous-investissement chronique dans des projets à long terme de la part de l'agent, la régulation environnementale n'est susceptible d'améliorer les profits espérés de la

firme que sous certaines conditions relatives au type de politique mise en vigueur, à l'étendue des inefficiences, aux coûts de déploiement des innovations potentielles et à leurs effets sur la productivité et le coût d'abattement.

Même si le conflit d'intérêt est nécessaire pour permettre à la réglementation d'avoir un impact positif sur les profits espérés du point de vue du dirigeant, une aggravation des problèmes d'incitation ne rend pas plus plausible l'impact positif de la politique environnementale. Pour que cette dernière puisse être bénéfique les différences de préférences temporelles entre l'agent et le principal doivent rester modérées<sup>9</sup>.

La nature des innovations potentielles joue aussi un rôle déterminant. Les innovations avec un effet de productivité moyenne et un effet significatif sur le coût d'abattement s'avèrent plus susceptibles d'être bénéfiques. Concernant l'effet productivité, celui-ci doit être suffisamment élevé même sans réglementation pour que le dirigeant soit initialement favorable aux investissements de long terme. Cependant il ne doit pas être trop élevé puisque dans ce cas le manager investirait même sans intervention politique. Pour ce qui est de l'effet coût d'abattement, plus la nouvelle technologie réduit ce coût impliquant une convergence des décisions de l'agent et du principal.

Finalement la nature de la politique environnementale affecte également les résultats. L'impact de la réglementation ne s'avère positif que si celle-ci est suffisamment flexible. Une politique rigide qui vise à la mise en place de technologies en bouts de chaîne n'est pas bénéfique même en présence de problèmes d'incitation puisqu'elle conduit à imposer un coût d'abattement sans impacter la productivité de la firme que l'innovation ait eu lieu ou pas. Dans le cas d'une politique incitant à investir dans les meilleures technologies disponibles (sur étagère), c'est l'effet d'incitation à l'innovation qui devient nul.

**Ambec et Barla (2002)** considèrent aussi à travers un modèle d'agence les conditions sous lesquelles la politique environnementale peut surmonter l'inertie organisationnelle. Dans leur modèle l'agent possède une information privée sur le coût de production d'une nouvelle technologie moins coûteuse, issue d'un programme de R&D, qui de plus est non polluante. Le manager utilise son avantage informationnel de manière opportuniste en exagérant le coût afin de s'approprier une rente informationnelle. Ce point résulte du fait que le résultat de la R&D est incertain et que par conséquent la firme ne peut observer de manière exacte le coût de production de la nouvelle technologie. Afin de réduire cette rente qui est proportionnelle au niveau de production, le principal pourrait diminuer la production si l'agent annonce l'échec du programme. Cette possibilité de distorsion de la production n'est cependant pas crédible car elle conduit *ex post* à une réduction du profit du principal.

Contrairement au principal, le décideur public peut cependant s'engager de manière crédible à un niveau de production socialement optimal soit en limitant directement la quantité produite (permis d'émission ou standard de performance), soit en imposant une taxe sur les émissions, rendant ainsi la divulgation d'informations erronées moins attractive. La réglementation réduit par conséquent la rente informationnelle du manager et favorise l'investissement en R&D. Les auteurs montrent que l'hypothèse de Porter est susceptible d'être vérifiée si les conditions

---

<sup>9</sup> Si contrairement à ce qui est supposé, le manager a une préférence pour l'avenir plus marquée que le dirigeant, il existe toujours un problème d'incitation dans la mesure où c'est l'investissement sur les projets à long terme de la part du manager, souhaitant cette fois-ci accroître la visibilité et la crédibilité de ces projets, qui devient excessif. Dans ce cas la réglementation, en rendant l'innovation encore plus attractive pour le manager, tend à exacerber le problème d'incitation.

suivantes sont remplies. Tout d'abord la probabilité d'obtenir une technologie plus productive et plus propre doit être suffisamment élevée (l'investissement doit avoir un impact significatif sur cette probabilité). Ensuite, la baisse du coût marginal obtenue *via* la nouvelle technologie doit aussi être significative. Enfin, la politique environnementale doit avoir un impact relativement faible sur le profit généré par la technologie polluante comparé à son effet sur la quantité produite. Une politique fondée sur un instrument de quantité (standard) s'avère ainsi préférable à un instrument de prix (taxe).

Gabel et Sinclair-Desgagné (Gabel & Sinclair-Desgagné, 1993; Sinclair-Desgagné & Gabel, 1997; Sinclair-Desgagné, 1999) ont également adopté la théorie de l'agence pour étudier l'impact de la réglementation environnementale sur les mécanismes mis en place par le principal pour inciter l'agent à allouer son attention et son temps limités entre deux types de R&D dont l'un améliore la production à court terme et l'autre l'impact environnemental de la firme à long terme. Les deux activités sont supposées contribuer au profit de la firme. Dans leurs modèles le principal ne contrôle pas directement l'allocation de l'effort de l'agent mais il est capable d'inférer *imparfaitement* cette allocation à partir de l'observation des performances sur les deux activités.

Gabel et Sinclair-Desgagné (1993) montrent que lorsque l'agent a tendance à sous-investir de manière générale en R&D, il peut être optimal d'instaurer un mécanisme d'incitation où la rémunération du manager dépend de sa performance sur chaque activité, même si une telle incitation conduit à faire supporter au manager, supposé plus riscophobe que le principal, une partie du risque. Il s'avère difficile dans ce cadre de justifier l'impact positif de la réglementation sur la firme dans la mesure où c'est la réglementation environnementale même qui crée le problème d'agence et qui conduit à un optimum de second rang.

Contrairement à leur contribution précédente Desgagné & Gabel (1997) et Sinclair-Desgagné (1999) introduisent la possibilité de contrôler l'allocation de l'effort de l'agent à travers un audit environnemental. Dans la mesure où l'audit a un coût, la firme doit décider du processus d'audit optimal permettant de mettre en place le mécanisme de rémunération le plus approprié. Un des intérêts de ces modèles consiste par ailleurs à différencier entre le degré d'aversion au risque de l'agent et son degré de prudence<sup>10</sup>.

Il est montré qu'en présence d'audit, il est préférable d'avoir un éventail de rémunération plus large pour l'agent. Le type d'audit ainsi que le niveau espéré de rémunération qui lui est associé dépendent cependant de ce que le degré de prudence de l'agent domine ou non son degré d'aversion au risque. Si la prudence domine l'aversion au risque, il s'avère optimal de déclencher l'audit environnemental lorsque la performance à court terme est élevée et d'offrir une rémunération espérée plus élevée que le salaire en l'absence d'audit. Si au contraire l'aversion au risque domine la prudence, l'audit est mis en place lorsque la performance à court terme est faible et la rémunération espérée est plus faible qu'en l'absence d'audit. Autrement dit, suivant que la prudence domine ou pas l'aversion au risque, l'audit donne lieu à une rémunération espérée plus élevée ou plus faible que le salaire en cas de non-audit. Il est aussi montré que la mise en place d'un audit pourrait conduire l'agent à accorder une importance excessive aux activités environnementales à long terme. Toutefois, le risque que cela se fasse au détriment des activités à court terme est évité par la structure même de la

---

<sup>10</sup> Dans ce contexte multi-activités, la prudence signifie que l'agent se prémunit contre le risque en choisissant une allocation de son effort qui augmente son revenu moyen, tandis que l'aversion au risque implique que l'agent tendra à distribuer son effort pour diminuer la probabilité d'occurrence des pires résultats.

stratégie d'audit. Par exemple si la prudence domine l'aversion au risque, l'agent souhaite être audité mais aussi que le résultat de l'audit soit positif. Il est conduit par conséquent à consacrer un effort élevé à la fois pour améliorer le profit à court terme et la performance environnementale pour augmenter la probabilité que le résultat de l'audit lui soit favorable. La possibilité d'un audit rend ainsi l'attention portée aux activités à court terme complémentaire de l'attention portée à la protection de l'environnement. Autrement dit, si l'agent accorde plus d'importance à l'environnement il a aussi intérêt à intensifier son effort sur les activités pour améliorer le profit à court terme de l'entreprise. Il s'avère ainsi possible de créer une stratégie d'audit qui permet de créer une complémentarité entre les deux types d'effort dans la fonction d'utilité de l'agent alors qu'initialement ceux-ci étaient perçus comme substituables. Ce résultat suggère ainsi que même si l'audit environnemental génère des coûts pour la firme, lorsque la complémentarité est suffisamment forte celui-ci peut réduire les coûts d'incitation et améliorer le profit à court terme de la firme en créant des synergies entre activités environnementales et activités productives.

## **E. Gestion de la contrainte environnementale : les aspects organisationnels et cognitifs**

L'hypothèse de Porter a été également abordé en s'intéressant plus explicitement à la dimension managériale des firmes à travers notamment leur structure organisationnelle. Ces travaux abandonnent en partie l'hypothèse de rationalité parfaite des décideurs et se focalisent davantage sur le rôle des routines et des processus de décision au sein des firmes en adoptant une approche cognitive (Simon, 1945, Cyert & March, 1992) et évolutionniste (Nelson et Winter, 1982). Dans ce cadre la capacité des firmes à tirer profit de la réglementation environnementale<sup>11</sup> et à bénéficier des opportunités qu'elle suscite dépendent avant tout des structures de décision interne, des mécanismes de coordination et de communication, des processus d'apprentissage organisationnel.

En se référant aux instruments de marché (permis d'émission) Stavins (2003) note par exemple que durant la phase d'initiation de ces instruments, l'incertitude qui les caractérise et le manque d'expérience des firmes peuvent avoir des conséquences importantes sur leur performance : *"One potentially important cause of the mixed performance of implemented market-based instruments is that many firms are simply not well equipped to make the decisions necessary to fully utilize these instruments. Since market-based instruments have been used on a limited basis only, and firms are not certain that these instruments will be a lasting component on the regulatory landscape, it is not surprising that most companies have not reorganized their internal structure to fully exploit the cost savings these instruments offer. Rather, most firms continue to have organizations that are experienced in minimizing the costs of complying with command-and-control regulations, not in making the strategic decisions allowed by market-based instruments. The focus of environmental [...] departments in private firms has been primarily on problem avoidance and risk management, rather than on the creation of opportunities made possible by market-based instruments. This focus has developed because of the strict rules companies have faced under command-and-control regulation, in response to which companies have built skills and developed processes that comply with regulations, but may not help them benefit competitively from environmental*

---

<sup>11</sup> Au delà des coûts de transaction élevés que les instruments politiques peuvent générer et de leur *design* inefficace durant leur phase de d'introduction.

*decisions. Absent significant changes in structure and personnel, the full potential of market-based instruments will probably not be realized (p.9)".*

En se focalisant sur le rôle de l'innovation, Burtraw (2000) estime par exemple que le programme de permis négociables d'émission de dioxyde de soufre mis en place dans les années 90 aux Etats-Unis a permis d'atteindre les objectifs fixés à un coût bien moindre que ce que les analyses *ex ante* laissaient prévoir. L'auteur souligne cependant que ces réductions de coûts ont été rendues possibles par un ensemble d'innovations qui n'étaient pas seulement technologiques mais relevaient aussi du changement organisationnel dans les firmes. Durant l'émergence du nouveau marché, lorsque l'incertitude était forte les firmes ont adopté des stratégies plutôt visant à se conformer simplement à la réglementation. Toutefois progressivement elles ont procédé à des adaptations et à des innovations organisationnelles plus significatives visant à bénéficier des opportunités offertes par ce nouveau programme. L'auteur donne notamment l'exemple des firmes au sein desquelles au départ la responsabilité environnementale était déléguée aux chimistes et aux ingénieurs et qui par la suite a été transférée plus systématiquement aux responsables financiers qui étaient plus à même de développer des outils et des compétences permettant de gérer de manière synergétique les activités productives et environnementales des firmes pour générer des opportunités d'affaires.

Dans une contribution récente Arjalies et Ponsard (2010) étudient également à travers trois études de cas la dimension managériale de l'hypothèse de Porter en considérant la structuration des stratégies des firmes dans un environnement incertain. Les auteurs distinguent deux phases dans le développement de la gestion environnementale qui correspondent respectivement à une vision en termes de risques et à une vision en termes d'opportunités de la réglementation. Chacune de ces phases est associée à un système de gestion différent. Il est suggéré que la capacité à soutenir l'hypothèse de Porter dépend de la phase dans laquelle une firme se situe.

De manière plus formalisée, Gabel & Sinclair-Desgagné (1999, 2001) et Sinclair-Desgagné (1994) s'interrogent sur l'impact de la réglementation environnementale en présence d'inerties et d'inefficiences organisationnelles (erreurs de décisions systématiques et coûteuses) liées aux routines de prises de décision, aux procédures d'opération standardisées et à l'attention limitée des décideurs au sein des firmes.

**Gabel & Sinclair-Desgagné (1999)** proposent à cet effet un modèle graphique où une firme ayant développé progressivement un système complexe de routines décisionnelles adapté à son environnement et maximisant ses profits est confrontée à une mutation de son environnement économique. Ce changement est provoqué par la mise en place d'une politique environnementale visant à instaurer l'optimum social. Une réponse efficace à cette mutation requiert cependant de la firme de revoir l'ensemble de son système de routines de décision. En s'appuyant sur l'argument de rationalité limitée, les auteurs soulignent que si la firme donne la priorité au coût de la restructuration radicale de son système de procédures, autrement dit, si au delà de la contrainte environnementale, la contrainte organisationnelle est prise en compte, la restructuration requise pour bénéficier des nouvelles opportunités de profits générées par la régulation environnementale peut ne pas être engagée et la firme peut simplement se limiter à minimiser le coût supplémentaire provoqué par la réglementation.

Sinclair-Desgagné (1994) et Gabel & Sinclair-Desgagné (2001) ont également proposé des modèles d'agence qui examinent les liens entre politique environnementale, organisation

interne de la firme (centralisée versus décentralisée) et mécanismes de communication, de contrôle et d'incitation en présence de possibilités d'erreurs de décision.

**Sinclair-Desgagné (1994)** montre que l'organisation interne des firmes devrait davantage être prise en compte dans l'administration des politiques environnementales dans la mesure où celles-ci sont susceptibles d'affecter de manière positive ou négative les règles de décisions au sein des firmes.

**Gabel & Sinclair-Desgagné (2001)** conçoivent également un modèle où le rôle du dirigeant de la firme est de mettre en place une stratégie organisationnelle pour les managers dont les décisions peuvent systématiquement comporter des erreurs de décisions. L'objectif du dirigeant est de minimiser la probabilité de ces erreurs. Celui-ci utilise deux leviers d'action pour structurer le processus de décision. Le premier concerne les dépenses ( $D$ ) pour mettre en place une gestion environnementale, autrement dit pour former le manager, l'informer et l'auditer. Le second levier porte sur le degré d'autonomie décisionnelle ( $X$ ) du manager (poids des procédures opérationnelles standardisées ou degré de centralisation des décisions). Lorsque l'autonomie du manager est réduite il devient moins nécessaire de lui disséminer des informations et de l'auditer. La décentralisation est assimilée à une situation où seule la recommandation du manager est prise en compte, tandis que sous une structure centralisée un projet n'est accepté que si le chef d'entreprise entérine la recommandation du manager.

Les erreurs de décisions peuvent être de deux types. Elles concernent d'une part les projets qui comportent un risque environnemental excessif (erreur de type II). Elles portent d'autre part sur les erreurs consistant à ne pas choisir les projets légitimes et profitables (erreur de type I). Il est supposé qu'en présence d'une gestion environnementale la probabilité d'occurrence des deux types d'erreurs est réduite. En revanche, une autonomie plus restreinte du manager réduit la probabilité de projets négligents d'un point de vue environnemental, mais elle augmente la probabilité que des opportunités profitables soient omises dans la mesure où le manager est le seul à disposer d'informations sur ces opportunités.

La politique environnementale impose deux types de coûts. Le coût  $C1$  qui constitue le niveau des dommages à rembourser suite à un projet négligent et le coût  $C2$  qui correspond aux dommages à rembourser suite à un accident issu d'un projet non-négligent.

Il est montré que  $D$  et  $X$  augmentent jusqu'à ce qu'il ne soit plus économique de les augmenter et non pas jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'erreurs possibles. Il est aussi montré qu'une augmentation des coûts imposés par la politique ( $C$ ) modifie l'organisation optimale de la firme mais que cette réorganisation dépend de manière critique de la structure des coûts imposés ( $C1$  et  $C2$ ).  $C1$  correspond aux pénalités imposées pour les accidents sur les projets négligents,  $C2$  reflète les coûts supportés pour les accidents provoqués par des projets non négligents.

Les auteurs examinent dans ce cadre l'hypothèse de Porter relative à l'impact de la politique environnementale sur la probabilité de la firme de bénéficier d'opportunités profitables. Une politique plus stricte qui réduit les accidents tout en encourageant à détecter davantage d'opportunités profitables devrait favoriser à la fois l'autonomie des managers et augmenter les dépenses internes de formation et de contrôle. L'analyse montre qu'une telle organisation sera mise en place si la politique combine deux éléments : un niveau de  $C1$  élevé et un niveau de  $C2$  faible.

L'impact de la politique environnementale sur les profits espérés reste cependant plus difficile à déterminer dans la mesure où à la fois la politique environnementale et la stratégie organisationnelle de la firme imposent des coûts - coût d'audit (effet de *D*), coût plus élevé des accidents provoqués par des projets négligés (effet de *C1*) et coût des opportunités manquées lié à la centralisation (effet de *C1*) - qui ne sont pas nécessairement compensés par leurs effets positifs sur les profits - augmentation des opportunités détectées *via* plus de formation (effets de *C1* et *C2*), diminution de la probabilité de projets négligés (effet de *C1*) et pénalités plus faibles sur les projets non négligés (effet de *C2*).

## Conclusion de la Partie I

Nous avons proposé dans cette première partie une revue extensive de la littérature théorique consacrée aux contributions qui explorent et examinent les implications sur les politiques environnementales lorsque celles-ci visent à influencer et à orienter les activités de R&D des firmes. Au vue de l'étendue et de l'hétérogénéité de la littérature dans ce domaine et dans la perspective de notre contribution dans la Partie 2 de ce rapport, nous avons limité notre travail aux contributions qui s'intéressent plus particulièrement au rôle des différentes sources d'incertitude (R&D, dommage climatique, politique, marché) dans la conception et le choix des instruments de politiques environnementales. Ce faisant nous avons mobilisé divers champs de la littérature économique relatifs notamment aux théories de l'organisation industrielle, aux théories de la croissance endogène et aux théories de la firme. Les premiers œuvrent dans une perspective d'équilibre partiel, les seconds se placent davantage au niveau sectoriel ou de l'économie de manière plus étendue, tandis que les théories de la firme mettent l'accent sur les facteurs internes susceptibles d'expliquer le comportement décisionnel des firmes.

Nous avons dans un premier temps focalisé notre attention sur la comparaison entre différents instruments de politiques environnementales (taxe, permis d'émission, standard de performance ou standard technologique). Une conclusion principale de ces travaux est que l'incertitude du processus de R&D et les caractéristiques du marché de l'innovation affectent de manière critique la conception et le choix des instruments. Tout d'abord les travaux qui se focalisent sur la comparaison entre la réglementation par les prix (taxe) et la réglementation par les quantités (permis, standard) montrent qu'en présence d'incertitude sur le processus de R&D, le choix optimal du planificateur social s'oriente de préférence vers la réglementation par les quantités dans la mesure où celle-ci permet de mieux contrôler la flexibilité supplémentaire que confère la R&D aux firmes au delà de leur pouvoir discrétionnaire sur leur décision d'abattement des émissions en présence d'une réglementation par les prix.

Ensuite, la prise en compte de la possibilité pour les entreprises d'innover (et de réduire leur coût d'abattement) conduit à mieux appréhender l'impact du fonctionnement du marché de la R&D sur les comportements des firmes. Ces travaux prennent notamment en compte les caractéristiques de 'bien public', de 'bien commun' de la connaissance dans une perspective sociale et les défaillances du marché de l'innovation (écart entre bénéfices privé et social de l'innovation, congestion du marché de R&D, pouvoir de monopole de l'innovateur) et leurs implications en termes de politiques environnementales. Il est notamment montré que la prise en compte des interactions stratégiques entre les firmes, conduisant à des défaillances sur le marché de R&D, modifient la façon dont les instruments de politiques environnementale (taxe, permis, standard, subvention) doivent être conçu pour corriger les incitations de R&D et améliorer le bien être social. Par exemple, la taxe optimale imposée par les pouvoirs publics pour inciter les entreprises à respecter le niveau d'abattement socialement optimal peut ne pas forcément être égale au dommage marginal mais peut suivant les contextes être supérieur ou inférieur au dommage marginal. De même suivant les circonstances (relatifs aux coûts de R&D, à la structure du marché de R&D, à l'ampleur des retombées des résultats de R&D) le classement, en termes d'impact incitatif et d'amélioration du bien être social, entre les différents instruments de politiques environnementales peut changer. De même, en présence d'incertitude et d'une double défaillances des marchés (externalités négatives provoquées par les émissions et externalités positives induites par la R&D) il s'avère critique

de compléter les politiques environnementales par des politiques technologiques (contrat de recherche, subvention, concours d'innovation).

Enfin la prise en compte de la capacité ou non d'engagement des pouvoirs publics et l'incertitude sur les décisions politiques affectent de manière importante l'incitation du secteur privé à engager des investissements de R&D. Lorsque la R&D est incertaine ou les investissements dans ce domaine sont significatifs il s'avère préférable pour le planificateur social de s'engager *ex-ante* pour influencer le niveau d'investissement tout en adoptant un régime politique qui intègre la nature stochastique du processus de R&D. L'engagement *ex-post* en revanche a pour inconvénient de générer des activités d'influences pour orienter les décisions politiques. Par ailleurs si l'incertitude sur la l'ampleur des politiques a un impact dépressif sur la R&D, une incertitude sur la temporalité de mise en place d'une politique clairement définie semble favoriser les activités d'innovation dans la mesure où elle incite les firmes à engager des projets exploratoires pour mieux se préparer à la mise en place future d'une politique environnementale.

A la différence des travaux exposés dans le Chapitre 1 où l'analyse porte sur le niveau de R&D des firmes, notre objectif dans le Chapitre 2 a été de mettre en avant le rôle des politiques environnementales dans l'orientation des trajectoires et des choix technologiques et dans le maintien de la diversité technologique. Ces contributions s'intéressent plus particulièrement aux caractéristiques des différentes technologies (technologies existantes où l'apprentissage se fait par l'usage et nouvelles technologies où l'apprentissage se fait par R&D, différentes fonctions de coût d'abattement, technologies plus ou moins flexibles, projets de R&D plus ou moins risqués, technologies se différenciant par leur potentiel à court et à long termes, technologies radicales ou incrémentales, technologies plus ou moins carbonées).

Lorsque l'on considère l'allocation des efforts entre technologies existantes (abattement ou progrès technique à travers l'apprentissage par la pratique) et les technologies nouvelles (amélioration par la R&D) la plupart des travaux montrent qu'en présence d'incertitude technologique (contrairement au cas où le processus de R&D est déterministe) le niveau d'abattement est généralement plus faible en attendant le changement technique. Surtout dans le cas d'un objectif ambitieux de stabilisation de la concentration des émissions à long terme une politique environnementale modérée (taxe ou contrainte d'émission) et une politique technologique de soutien actif s'avèrent donc plus effectifs en termes de coût-bénéfice. Néanmoins certains travaux mettent en avant des interactions plus complexes entre politique environnementale et politique technologique, nécessitant une coordination et une complémentarité étroite entre les deux démarches. Surtout en présence d'une double incertitude à la fois technologique et environnementale, chacune des politiques peut être considérée comme une stratégie de couverture contre les risques de l'autre. Dans ce cas la politique environnementale constitue une assurance contre le risque d'échec technologique et la politique technologique représente une assurance contre le risque d'une catastrophe environnementale.

Ces travaux montrent également que les politiques et les stratégies de R&D dépendent de manière cruciale des caractéristiques technologiques. Cependant les différentes contributions se distinguent de par la nature des incertitudes considérées. Certains auteurs supposent un processus de R&D déterministe et analysent l'impact des incertitudes environnementales ou politiques pour montrer que les décisions d'allocation des efforts de R&D entre différentes technologies dépendent de manière cruciale de la perception qu'ont les acteurs de ces incertitudes. Cette perception influence également les stratégies d'investissement des firmes suivant la flexibilité de leur système productif leur conférant plus ou moins de marge de

manœuvre dans l'allocation de leur effort de R&D. D'autres travaux supposent une incertitude technologique à travers notamment des projets plus ou moins risqués. Un des résultats intéressants est de montrer que lorsque la possibilité d'une catastrophe climatique est perçue comme faible/modérée le rôle de la politique technologique devrait être de soutenir des projets de R&D plus risqués dans le domaine des énergies non carbonées dans la mesure où la seule possibilité pour ces technologies à haut risque de percer est une rupture. En revanche, si les dommages sont perçus comme pouvant être sévères, les gouvernements pourraient avoir pour rôle de soutenir des projets plus risqués dans le domaine des énergies carbonées dans la mesure où dans ce cas ces technologies seront perçues par les firmes comme étant beaucoup plus risqués. Enfin il s'avère aussi que différents instruments de politiques environnementales (taxe, permis d'émission, standard) conduisent à différents choix technologiques de la part des firmes dans la mesure où les firmes adaptent leur choix technologique aux risques inhérents et spécifiques à chacun des instruments.

Un autre aspect abordé porte sur la diversification du portefeuille de R&D. L'examen porte sur la façon dont les politiques affectent la composition du portefeuille et la dynamique de spécialisation / diversification en fonction des incertitudes politiques et technologiques. A la fois la sévérité de la politique environnementale, son incertitude affecte la diversité technologique. Une politique modérée favorise notamment la diversité technologique alors qu'une politique sévère la réduit. De même l'impact de l'incertitude sur la diversité reste ambigu. Dans certains modèles elle favorise la diversité en raison de la volonté des firmes de se couvrir contre les risques politiques alors que dans d'autres elle provoque une allocation moins diversifiée et a un impact négatif sur le niveau global de R&D. Il est cependant montré qu'une augmentation de l'incertitude politique est susceptible de conduire à une intensification des recherches dans les technologies propres au détriment des énergies traditionnelles en raison de la volonté des firmes de s'assurer contre l'incertitude politique et de la possibilité de rupture technologique. Une implication est que le maintien de la diversité requiert de la part du décideur politique de ne pas stigmatiser les événements extrêmes mais de favoriser une vision plus équilibrée sur les différents scénarios politiques possibles. Enfin il s'avère aussi que le choix des instruments de politiques environnementales influencent le degré de diversité technologique – les permis d'émission favorisant la diversité et la taxe et les standards au contraire provoquant un verrouillage prématuré sur les technologies ayant surtout un avantage à court terme.

Ainsi les travaux présentés dans le Chapitre 2 montrent qu'en présence de plusieurs technologies, la prise en compte de leurs caractéristiques et de leurs incertitudes peuvent rendre plus complexes la planification des politiques environnementales. Leur conception et leur impact peuvent en effet dépendre d'une multiplicité de facteurs liés notamment aux difficultés des projets de R&D, des rendements décroissants à l'échelle des activités de R&D, des contraintes et des incertitudes climatiques, des effets de portefeuille (externalités de marchés et externalités technologiques), des contraintes budgétaires, du degré de flexibilité du système productif, du degré de risque des projets, de la sévérité et de la perception qu'ont les firmes des politiques environnementales et des risques spécifiques imposés par les différents instruments, tous affectant d'une manière ou d'une autre l'allocation des efforts de R&D, les trajectoires technologiques et la diversification du portefeuille technologique.

A la différence des deux premiers chapitres qui considèrent la firme comme une boîte noire, le Chapitre 3 s'est focalisé sur les travaux engagés suite à l'hypothèse de Porter sur la rentabilité de la réglementation environnementale pour les firmes, en considérant le rôle que peuvent jouer les politiques environnementales pour corriger d'une part les défaillances de

marché et d'autre part influencer le fonctionnement interne des firmes. Notre revue de la littérature s'est concentrée plus particulièrement sur la seconde approche. Ces travaux mettent l'accent sur le rôle de l'incertitude, l'aspect comportemental /cognitif durant le processus de décision, et les inefficiences / défaillances organisationnelles résultant de conflits d'intérêts, de problèmes de coordination / communication au sein des firmes. Il est par exemple suggéré que ce sont les comportements individuels et les systèmes / processus de gestion organisationnelle et collective qui les conditionnent qui déterminent la capacité des entreprises à bénéficier des politiques environnementales. Il importe en ce sens d'administrer les politiques environnementales de façon à ce que celles-ci puissent provoquer des changements de l'intérieur dans les firmes et déclencher une modification de leur processus de gestion et organisationnel. Ces travaux considèrent notamment le comportement face au risque des décideurs (managers), leur préférence temporelle (biais pour le présent), les divergences d'intérêt entre propriétaire et managers et les structures organisationnelles dans le domaine de la gestion environnementale et la façon dont chacun de ces attributs peut être affecté par la politique environnementale et les conditions sous lesquelles cet impact peut être profitable aux firmes. Ces modèles suggèrent également que dans une industrie composée d'entreprises hétérogènes il est possible que la réglementation ait des effets distincts sur les firmes suivant leur caractéristiques internes et donc sur leur profitabilité. La Partie II de notre rapport et surtout le modèle de simulation développé dans le Chapitre 2 s'inscrit dans cette perspective en étudiant la façon dont la structuration des processus de décision permettent aux entreprises d'ajuster leur portefeuille de R&D aux incertitudes à la fois technologique et politique auxquelles elles sont confrontées.

## **Patrie II**

### **Gestion de projets de R&D optionnels en présence d'incertitude endogène**

Nous nous proposons, dans cette partie, de mobiliser le raisonnement en termes d'options réelles dans une perspective qui vise à mieux rendre compte d'un certain nombre de préoccupations managériales liées à la gestion des activités de R&D. Ce cadre combine la théorie et le raisonnement en termes d'option réelle (Bowman & Hurry, 1993; McGrath *et al.*, 2004) et les travaux qui s'inscrivent davantage dans une démarche évolutionniste axée notamment sur le rôle des activités de recherche par exploration/exploitation dans les processus d'innovation et d'apprentissage organisationnel (March, 1991; Levinthal & March, 1993). Il nous semble que la conjugaison de ces courants de recherche, qui structure de manière centrale les réflexions engagées par certaines contributions (Kim & Kogut, 1994; Kogut & Kulatilaka, 2001; Adner & Levinthal, 2004; Miller & Arikan, 2004; Barnett, 2005 et 2008), constitue une voie possible pour approfondir les conditions et les conséquences de l'utilisation de l'approche en termes d'option réelle dans un contexte organisationnel. Dans la lignée de ces travaux, notre objectif est de proposer un cadre permettant de mieux appréhender le rôle et la performance des facteurs organisationnels et des critères de décision qui, *via* l'arbitrage et la coordination stratégique des activités recherche par exploration et par exploitation, gouvernent le processus de gestion et d'ajustement du portefeuille de projets technologique des firmes en présence d'incertitude. Plus précisément, en prenant en compte la nature séquentielle du processus de R&D, notre approche s'intéresse à l'agencement des critères de décisions d'options entre les différentes étapes de ce processus permettant de coordonner les activités d'apprentissage et de résolution d'incertitude par exploration et exploitation technologique.

L'originalité de notre contribution, par rapport aux modèles normatifs d'options réelles qui supposent des décideurs hyper-rationnels capables en présence d'incertitude d'anticiper l'avenir de manière parfaite, consiste à aborder les problématiques de décisions d'options en nous référant aux théories comportementales relatives à l'apprentissage et à l'innovation dans les organisations et les firmes (March, 1991). Nous nous référons pour ce faire à la littérature sur le raisonnement en termes d'options réelles dont un des apports a consisté à tenir compte de la tension existante entre la rationalité supposée dans la théorie des options réelles et l'importance des aspects cognitifs et organisationnels durant le processus de gestion des options (Kogut, 1991; Bowman et Hurry, 1993). La remise en question de la rationalité des décideurs et le défi managérial que constitue la gestion dynamique d'un portefeuille de projets optionnels lorsque la résolution de l'incertitude est endogène a notamment conduit à mettre en lumière les biais et les erreurs de décisions qui peuvent jaloner les trajectoires de détection, de soutien, d'abandon et d'exercice des options et qui orientent le processus d'apprentissage et l'accumulation, la valorisation des connaissances de la firme (Coff & Laverty, 2001; Adner & Levinthal, 2004a et 2004b). En intégrant dans la réflexion les implications de la rationalité limitée et de l'incertitude endogène, le raisonnement en termes d'options réelles a ainsi mis en avant l'importance de mieux expliciter le contexte managérial qui sous-tend le processus d'option. Dans ce cadre, les mécanismes cognitifs, organisationnels et les procédures de décisions qui régulent l'évaluation des options et l'ajustement du portefeuille de projets dans le

temps sont considérés comme des facteurs critiques pour expliquer la performance des firmes et leur capacité à bénéficier de la flexibilité inhérente à la logique d'option.

Dans le **Chapitre 1** nous présentons la théorie des options réelles et développons not cadre conceptuel. Le **Chapitre 2** développe notre modèle de simulation. Nous traitons dans ce cadre explicitement du comportement d'une firme active dans le domaine de la production d'électricité et qui doit gérer un portefeuille de R&D technologique dans un environnement où les incertitudes portent à la fois sur les technologies de production d'électricité et la politique de taxation du carbone. Contrairement aux modèles normatifs d'options, nous supposons que la firme se caractérise par une rationalité limitée durant les processus d'apprentissage et d'ajustement de son portefeuille de R&D dans le temps.

# 1. Théorie des options, R&D et arbitrage entre exploration-exploitation

Inspirée des travaux sur les contrats d'options financières, la théorie des options réelles (Dixit et Pindyck, 1994 ; Trigeorgis, 1996 ; Amram et Kulatilaka, 1999) s'est développée comme un cadre particulièrement propice pour étudier les décisions d'investissement en présence d'incertitude et d'irréversibilité. Cette approche a été utilisée à la fois comme un outil d'évaluation et comme heuristique dans la planification des investissements. Cet attrait se justifie par la logique des options réelles qui considère et intègre la valeur de la flexibilité inhérente aux décisions d'investissement permettant de répondre et de s'adapter à la volatilité de l'environnement et à la résolution de l'incertitude dans le temps.

Nous présentons dans un premier temps la théorie des options réelles appliquées à la problématique d'investissement dans des projets de R&D en présence d'incertitude (**Section A**). Nous précisons les liens entre la recherche par exploration/exploitation et la gestion d'un portefeuille d'options de R&D en nous appuyons sur le raisonnement en termes d'option réelles (**Section B**) et nous présentons notre modèle conceptuel en utilisant la notion de *chaîne d'options* pour rendre compte de la nature séquentielle du processus de R&D (**Section 3**). Nous explicitons dans ce cadre un certain nombre de critères clés de décisions d'options qui sous-tendent le processus de gestion stratégique des activités de recherche par exploration-exploitation dans le cadre d'un portefeuille de R&D et qui sont susceptible d'affecter de manière critique la dynamique de résolution d'incertitude et d'ajustement et la performance du portefeuille face à différents contextes d'incertitudes.

## A. La théorie des options réelles et activités de R&D

Une spécificité des modèles de décision fondés sur la logique d'option consiste à explicitement prendre en compte la valeur de la flexibilité lorsque les décisions d'investissement génèrent des irréversibilités et lorsque les résultats issus de ces décisions sont incertains. Dans le cas d'un investissement physique intensif en capital, la prise d'une option réduit le risque d'un engagement irréversible dans la mesure où elle permet *ex ante* de gérer de manière plus flexible cet investissement en le rendant conditionnel aux informations révélées sur ses potentiels. Par analogie avec la théorie financière la prise d'une option réelle sur un actif (sous-jacent) donne le droit mais non l'obligation d'exercer cette option (investir dans l'actif) pour bénéficier des revenus et des opportunités qu'il est susceptible de générer. Un des résultats clés de la théorie des options est que la valeur d'une option (de la flexibilité), et donc l'intérêt pour la détenir, augmente avec l'incertitude sur les opportunités potentielles inhérentes à l'actif. Cela s'explique par le fait que la prise d'option crée un profil de risque asymétrique: en versant une prime pour acquérir l'option (supposée largement inférieure au prix d'exercice pour acquérir l'actif irréversible), le détenteur de l'option s'octroie la possibilité de bénéficier des potentiels de gains à la hausse générés par l'actif si l'incertitude se résout favorablement, tout en contenant l'exposition aux pertes potentielles en abandonnant l'option si l'environnement s'avère défavorable. Ainsi, la clef d'une logique d'option est de pouvoir bénéficier de manière flexible des flux d'information réduisant l'incertitude entre la prise d'option et l'étape où doit être prise la décision l'exercer ou de l'abandonner.

Les investissements dans les projets de R&D présentent des caractéristiques d'options à double titre. Tout d'abord ces projets dérivent essentiellement leur valeur des potentiels de

croissance et des opportunités qu'ils permettent de créer pour les firmes. Leur nature optionnelle découle par ailleurs de la flexibilité managériale permettant d'ajuster les décisions en fonction de la disponibilité de nouvelles informations sur les projets. Ces décisions qui doivent être prises au moment d'engager de nouveaux investissements coûteux dépendent généralement de critères sur l'évolution des performances ou des coûts des projets de R&D.

Ces caractéristiques font que l'analyse des décisions de R&D est devenue un des thèmes dominant dans la littérature sur les options réelles<sup>12</sup>. Dans une approche financière Myers (1977) a été le premier à assimiler la R&D à une option. Dans la littérature dédiée au management stratégique, plusieurs auteurs (Bowman et Hurry, 1993; McGrath, 1997; Kogut et Kulatilaka, 2001) ont proposé l'approche en termes d'option réelles comme une alternative pour étudier les investissements technologiques en montrant les fortes similitudes des processus de R&D et d'innovation avec les attributs et le raisonnement en termes d'options réelles. De même la littérature empirique sur la R&D a insisté sur l'importance de la flexibilité en présence d'incertitude pour s'adapter aux changements (Thomke, 1997) et a montré la distribution asymétrique, typique aux options, des résultats en termes de bénéfices et de pertes liés aux projets R&D (Scherer et Harhoff, 2000).

Tandis que la plupart des modèles d'options réelles supposent une incertitude qui se résout simplement par le passage du temps et est exogène aux actions des firmes (la R&D dans ces modèles est simplement une option dont l'acquisition donne à la firme l'opportunité d'investir si l'incertitude se résout favorablement), un aspect fondamental dans la gestion des activités de R&D réside dans la capacité des firmes à résoudre de manière endogène l'incertitude (ou réduire les coûts / améliorer la valeur) d'une technologie ou de l'environnement. Dans ce cadre, les décisions de R&D à la fois dépendent de l'incertitude et affectent sa résolution. La résolution endogène de l'incertitude prend également en compte un certain nombre de phénomènes importants tels que l'interdépendance des décisions dans le temps induisant des dépendances de trajectoires par des effets d'apprentissage ou de synergies. Ces effets peuvent affecter de manière significative le choix des options dans le temps, leur valeur et le seuil de la valeur du sous-jacent à partir duquel est réalisé l'investissement final.

Sans se référer au concept d'option, Roberts et Weitzman (1981) ont été parmi les premiers à formaliser le programme dynamique de R&D comme un processus cumulatif d'acquisition d'information permettant à la firme de réduire l'incertitude sur les bénéfices d'un projet avec l'objectif de proposer des règles de décision pour l'arrêt optimal du programme étant donné l'information disponible à chaque étape sur les revenus du projet. Les auteurs montrent que lorsque le programme peut être arrêté à tout moment, il peut être bénéfique d'initier la R&D, surtout lorsque l'incertitude est élevée, même si *ex ante* la valeur espérée du projet est négative. Child et Triantis (1999) ont également proposé un modèle séquentiel de résolution endogène de l'incertitude où la firme mène des activités de R&D sur deux projets technologiques mutuellement exclusifs pour commercialiser un produit (seul le projet le plus rentable étant retenu à la fin du processus R&D). L'article montre, notamment face à la décision d'intensifier l'effort de R&D sur un projet, la nécessité d'arbitrage entre les effets négatifs liés à l'augmentation des coûts et à la perte de flexibilité d'une part, et les effets positifs liés à la résolution rapide de l'incertitude et à l'accélération des revenus générés par le projet déployé d'autre part. Contrairement au modèle précédant, Koussis *et al.* (2007)

---

<sup>12</sup> Un numéro spécial de *R&D management* en 2001 (Vol. 31, N° 2) est notamment consacré à l'application de la théorie des options réelles aux décisions de R&D. Newton *et al.* (2004) offrent une revue de la littérature sur les modèles normatifs d'évaluation des options de R&D. Hartman et Hassan (2006) proposent une revue de la littérature empirique dédiée à l'application des méthodes d'évaluations d'options dans l'industrie pharmaceutique.

considèrent la R&D comme optionnelle et s'intéressent aux facteurs qui affectent son exercice optimal en présence d'un seul projet. La firme a le choix entre reporter la R&D (flexibilité opérationnelle) et investir sans effectuer de R&D. L'hypothèse d'endogénéité crée des dépendances de trajectoire par le fait que le choix de la firme affecte à la fois la valeur espérée du projet et l'efficacité du processus de R&D *via* l'apprentissage par la pratique. Les auteurs comparent dans ce cadre deux stratégies - la R&D accélérée avec un coût et un impact espéré élevés et la R&D par palier où une première action de R&D à faible coût et à faible impact espéré peut être poursuivie (optionnelle) par une autre action de même ampleur. Il est montré qu'en présence d'apprentissage par la pratique, la valeur d'option de la stratégie par palier augmente et celle-ci est exercée plus tôt qu'en l'absence d'un tel apprentissage. Cependant les avantages de la stratégie par palier l'emportent sur ceux de la stratégie accélérée que lorsque la valeur du projet est faible. Par ailleurs dans la mesure où une augmentation de l'incertitude conduit à augmenter le seuil de la valeur du projet à partir duquel la R&D est exercée (durée de l'option d'attente plus longue), le recours à la stratégie séquentielle devient de moins en moins fréquente avec l'augmentation de l'incertitude.

Childs *et al.* (1998) ont également examiné dans le cadre d'un modèle d'option les stratégies dynamiques de R&D lorsque la firme a la possibilité d'explorer deux projets technologiques mutuellement exclusifs permettant de commercialiser un produit. Deux stratégies d'apprentissage sont analysées dans leur contribution: parallèle et séquentielle. En se focalisant sur la stratégie séquentielle, à l'instar de Weitzman (1979), mais en présence d'une corrélation partielle entre les projets, leur contribution montre qu'il peut être préférable de développer d'abord le projet le plus incertain (au-delà d'un certain seuil), même si sa valeur est moins élevée, en raison de l'avantage informationnel de ce choix qui permet à la firme de prendre une décision plus éclairée sur les mérites d'engager des coûts de R&D sur le second projet. En termes d'options, la possibilité dans ce cas de substituer les projets atténue les risques à la baisse du projet le plus volatil tout en préservant son potentiel de gain. En revanche, lorsque les projets sont parfaitement corrélés, toute résolution d'incertitude sur un projet conduit également à réduire l'incertitude sur l'autre projet. Dans ce cas le projet le plus profitable est développé en premier. La comparaison entre la stratégie séquentielle et la stratégie parallèle suggère que la première stratégie domine lorsque les projets sont fortement corrélés (possibilité d'apprentissage collatéral), ont une variance faible (permettant d'inférer à partir d'un projet les mérites de l'autre projet), des durées de R&D courtes, nécessitent des coûts de R&D élevés et des coûts de déploiement faibles (irréversibilité faible) et lorsqu'ils diffèrent sensiblement en termes de profitabilité. Alors que la R&D parallèle s'avère supérieure dans les conditions opposées. Child et Triantis (1999) étendent ce premier modèle pour rendre compte de mécanismes d'investissement hybrides plus sophistiqués (combinant les stratégies parallèle et séquentielle) tout en supposant toutefois une absence de corrélation entre les projets. Cette approche permet de construire plusieurs scénarios d'apprentissage et d'étudier leur optimalité suivant un certain nombre de déterminants critiques tels que le niveau d'incertitude des projets, leur profitabilité, l'intensité des investissements en R&D, la concurrence et les contraintes budgétaires. Il est notamment montré que lorsque l'incertitude est élevée au début de la phase de R&D, une stratégie optimale consiste à explorer plusieurs projets en parallèles durant une certaine période pour ensuite adopter une stratégie séquentielle.

La prochaine section inscrit le raisonnement en termes d'option réelle dans la perspective du choix stratégique que doivent effectuer les firmes dans le cadre de leur portefeuille de projets entre la recherche par exploration et la recherche par exploitation. Il s'agit de faire d'une part d'explicitation des dilemmes et les défis posés par la coordination entre ces deux formes

d'apprentissage technologique et d'autre part de rendre compte des biais et des trappes pouvant émerger en termes de décisions d'options.

## **B. Portefeuille d'options et recherches par exploration - exploitation**

La recherche en science des organisations a souligné l'importance des activités d'exploration-exploitation sur l'apprentissage et l'évolution des connaissances dans les firmes (March, 1991, 1996, 2006; Levinthal et March, 1993) et a suscité un intérêt croissant pour les motivations et les conséquences de ces activités d'un point de vue stratégique et managériale pour soutenir les capacités dynamiques des entreprises (McGrath 2001, Nerkar, 2003).

Pour March (1991) ces deux activités renvoient à deux logiques différentes d'apprentissage organisationnel : *“The essence of exploitation is the refinement and extension of existing competencies, technologies, and paradigms...The essence of exploration is experimentation with new alternatives”*. L'exploration inclut les activités tournées vers la variation, la prise de risque, la flexibilité, la découverte, tandis que l'exploitation se réfère plutôt à l'efficacité, à la sélection et à l'exécution (March 1991). Burgelman (1991, 2002) distingue également dans la stratégie des firmes deux processus qui relèvent respectivement d'une logique consistant à amplifier la variance et d'une logique visant davantage à l'atténuer. Pour Baum *et al.* (2000) *“exploitation refers to learning gained via local search, experiential refinement, and selection and reuse of existing routines. Exploration refers to learning gained through processes of concerted variation, planned experimentation, and play”* (2000). De même pour Benner et Tushman (2000), *“Exploitative innovations involve improvements in existing components and build on the existing technological trajectory, whereas exploratory innovation involves a shift to a different technological trajectory”* (2002). Pour Gavetti et Levinthal (2000) qui s'intéressent davantage au processus cognitifs d'apprentissage, l'exploration est davantage tournée vers l'avenir et repose sur une révision des croyances et des anticipations des agents tandis que l'exploitation est davantage tournée vers le passé et repose sur un apprentissage par l'expérience. En termes économiques, les revenus associés à l'exploration sont plus variables et distants dans le temps, tandis que les rendements associés à l'exploitation sont plus certains et proches. L'exploration peut par conséquent impliquer des variations substantielles de la performance et peut conduire à des succès mais aussi de nombreux échecs, tandis que l'exploitation renvoie à des performances plus stables (He et Wong, 2004). Dans le domaine des activités de R&D ces deux activités sont généralement définies et opérationnalisées en termes respectivement de recherche locale *versus* non locale (Sidhu *et al.*, 2007; Rosenkoph et Nerkar, 2001) ou en termes d'intensité *versus* envergure de la recherche (Katila et Ahuja, 2002).

La littérature consacrée à l'apprentissage organisationnel montre en effet que la façon dont les entreprises effectuent leur choix d'investissement et allouent leurs ressources et leur attention entre ces deux activités d'apprentissage peut être centrale pour la performance et le développement des capacités dynamiques des firmes dans un environnement incertain et changeant. Comme le note March (1991) *“Adaptive systems that engage in exploration to the exclusion of exploitation are likely to find that they suffer the costs of experimentation without gaining many of the benefits. They exhibit too many undeveloped new ideas and too little distinctive competence. Conversely, systems that engage in exploitation to the exclusion of exploration are likely to find themselves trapped in suboptimal stable equilibria”* (1991). Les organisations qui sont capables d'orchestrer et d'équilibrer de manière dynamique la recherche

par exploration pour créer des opportunités de revenus futurs et la recherche par exploitation pour s'approprier les bénéfices de leurs efforts d'exploration passés sont qualifiées d'ambidextres et sont considérées comme plus apte à développer et à maintenir un avantage concurrentiel (Gibson et Birkinshaw 2004, He et Wong 2004, Jansen *et al.* 2006, Sidhu *et al.*, 2007).

Bien que l'importance d'une approche ambidextre soit reconnue, les différences et les tensions qui existent entre ces deux types d'apprentissage ont conduit également la littérature sur l'apprentissage organisationnel à avancer de nombreux arguments pour souligner leur caractère incompatible (en termes notamment de cultures et de routines organisationnelles) et expliciter les défis soulevés par à la fois la gestion de chacun des processus d'apprentissage et leur arbitrage surtout lorsqu'ils sont en concurrence (March, 1991; Levinthal et March, 1993, McGrath, 1999). Comme le notent par exemple Levinthal et March (1993) *“where situations or proper responses are numerous and shifting, it is harder to specify and realize optimal inventories of knowledge. By the time knowledge is needed, it is too late to gain it; before knowledge is needed, it is hard to specify precisely what knowledge might be required or useful. It is necessary to create inventories of competencies that might be used later without knowing precisely what future demands will be”*. Ces défis et ces tensions lié à la gestion des connaissances peuvent ainsi être à la source de biais de décisions ainsi que de dépendances de trajectoires.

Dans le cadre d'un raisonnement en termes d'options réelles, ces biais de décision dans l'allocation des ressources des firmes, peuvent par une dynamique d'auto-renforcement, conduire à des trappes d'options qui peuvent se traduire soit par des trappes d'exploration, soit des trappes d'exploitation. Les préoccupations liées à la gestion de ces deux activités stratégiques se retrouvent en effet dans les modèles d'option notamment à travers l'ajustement du portefeuille de R&D en fonction des décisions d'options (attente, soutien, report, abandon et exercice). De manière générale il est possible de distinguer deux types génériques d'erreurs de décision pouvant conduire à des "trappes d'évaluation d'options" avec des conséquences coûteuses : les erreurs de type I qui consistent à soutenir de mauvais projets faussement prometteurs (trappe d'exploration) et les erreurs de type II qui consistent à abandonner ou à disqualifier trop hâtivement des bon projets faussement défaillants (trappe d'exploitation). En soutenant ou en abandonnant des projets de manière systématiquement biaisée au sein du portefeuille, la firme peut ainsi significativement restreindre sa flexibilité à travers sa propension soit à sur investir soit à sous investir. Cette perspective insistant sur les erreurs met ainsi l'accent sur les risques d'excès d'optimisme et de conservatisme durant le processus de gestion des options. Coff et Laverty (2001) et Adner et Levinthal (2004a, 2004b) ont par exemple soutenu qu'en présence d'une incertitude endogène, les décisions d'options peuvent ne plus être fidèle à un raisonnement en termes d'option réelle mais dévier, (1) soit vers une logique plus proche des modèles de décision tels que la VAN et être biaisées vers la sélection de projets à faibles risques et l'abandon de projets prometteurs mais incertains et nécessitant une longue période d'investissements successifs, soit (2) vers une logique de *slack search* où même si les résultats des projets sont mitigés et devraient conduire à les abandonner, la firme continue de les soutenir au vu des connaissances accumulées et des investissements déjà réalisés. Dans les deux cas, les recommandations d'une logique stricte d'option peuvent être violées, alors que le processus repose initialement sur un raisonnement en termes d'options.

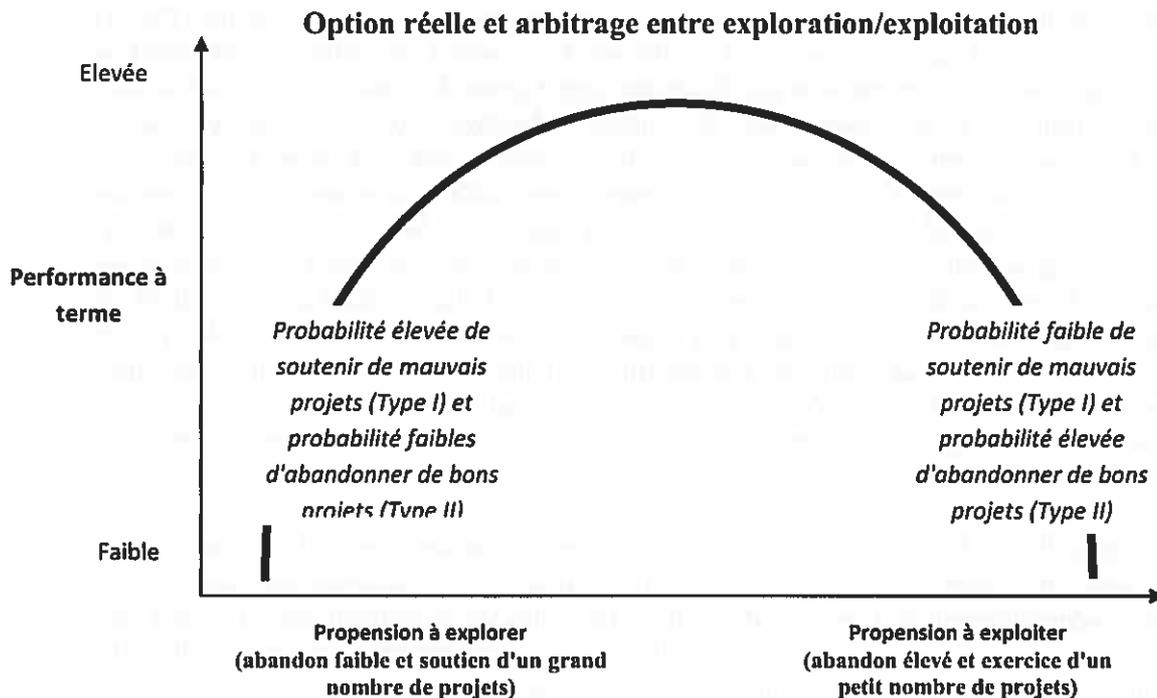
Un investissement excessif dans l'exploration peut résulter, si la firme, comme il est prescrit par la logique d'option, a initié un grand nombre de projets risqués dont les résultats ou les signaux intermédiaires ambigus ne permettent pas de démontrer clairement leurs échecs. Dans

ce cas, la firme peut ne pas aussi facilement abandonner les projets tels que supposé dans le mode d'emploi "rationnel" d'une logique d'option une fois que ceux-ci ont pris pied dans le portefeuille. Par exemple, dans le cas de projets de R&D sur lesquelles la firme a déjà accumulée des connaissances, constitué des réseaux et des équipes de recherche, l'option de continuer la recherche peut être justifiée même en présence d'échecs répétés. Il résulte dans ce cas un biais à la prise et au soutien de projets qui, en l'absence de preuves claires d'échec ou en présence de possibilités d'avancées imprévisibles incitent à intensifier l'engagement (Garud et Van de Ven, 1992). Comme le notent Levinthal et March (1993) : "...*failure leads to search and change which lead to failure which leads to even more search, and so on*". La trappe d'exploration peut ainsi avoir comme conséquence la perte de la flexibilité, liée initialement à la nature séquentielle du processus de décision et à la prise d'option sur un grand nombre de projets, en raison de la tendance de la firme à reporter de manière systématique l'abandon des projets en présence de signaux ambigus sur leur performance. Adner et Levinthal (2004a) précisent que *"the real options framework is intended to exploit the flexibility inherent in sequential investments. We argue that this flexibility stems from the possibility of abandoning investment initiatives, rather than from the simple substitution of a stream of smaller payments for a larger lump sum payment....Flexibility in search can undermine the flexibility associated with abandonment"*. Comme le soulignent aussi Coff et Laverty: *"purchasing an option on a strategic capability creates a constituency that will advocate further investment. Even with a marginal tendency to escalate, this problem may be amplified if using options logic leads the firm to undertake a large number of projects"*. L'incapacité d'une firme dans ce cas à déployer (exercer) une technologie et à capturer les bénéfices rendus possibles par le nombre élevé de projets risqués dans son portefeuille peut aussi en partie au moins s'expliquer par la tendance à constamment explorer de nouvelles alternatives sans allouer suffisamment de ressources pour exploiter de manière plus approfondie un ensemble restreint de technologies (Coff et Laverty, 2001).

A l'opposé, dans le cas d'une exploitation excessive, étant donné les projets déjà soutenus, un nouveau projet sur lequel la firme n'a pas encore accumulé de connaissances risque d'être abandonnée prématurément en l'absence de preuves tangibles sur sa performance. Lorsque par exemple un nouveau projet optionnel est introduit dans le portefeuille, il peut être difficile d'abandonner les projets déjà soutenus un certain nombre de fois (dans la mesure où une telle décision requiert une réorientation technologique majeure) et la firme pourra être davantage prédisposée à abandonner le nouveau projet. Dans ce cas non seulement la firme aura perdu l'opportunité mais également les ressources ayant permis le soutien du projet. Ce biais vers la recherche par exploitation, motivée par les dépendances de trajectoires créées illustre le risque que la flexibilité initiale se transforme en rigidité en réduisant la capacité de la firme à prendre ou à maintenir dans son portefeuille de projets de nouvelles opportunités émergentes (Leonard-Barton, 1992). Ce biais peut par ailleurs affaiblir la capacité des décideurs à reconnaître et à détecter les options latentes (*shadow options*) dans leur environnement ou celles qui peuvent être initiées à partir de leur compétences génériques pour les convertir en option réelle et les intégrer dans leur portefeuille (Bowman et Hurry, 1993).

Le défi posé par l'incertitude du processus d'innovation dans le cadre de la gestion d'un portefeuille de projets optionnels renvoie fondamentalement au choix stratégique d'arbitrage que doit effectuer la firme entre l'exploration et l'exploitation. Il s'agit dans ce contexte d'une part de ne pas sous-estimer les projets prometteurs mais incertain pour bénéficier de réelles opportunités et d'autre part de ne pas surestimer les projets faussement prometteurs qui consomment des ressources pouvant être utilisées à meilleur escient pour améliorer la connaissance de la firme sur d'autres projets.

La figure suivante intègre l'approche en termes d'exploration-exploitation et le raisonnement en termes d'option dans le cas d'un portefeuille de R&D pour rendre compte des dilemmes d'arbitrage auxquels peuvent être confrontées les firmes. De manière générale, une propension à explorer réduira la fréquence d'abandon des projets au sein du portefeuille et augmentera leur fréquence de soutien. La firme peut diminuer ce risque de sur exploration en orientant davantage sa stratégie d'option vers l'exploitation des projets. Cependant, une propension à l'exploitation sera associée à une fréquence élevée d'abandon et une réduction de la diversité du portefeuille. Autrement dit, l'exploitation augmentera le risque qu'un projet prometteur ne soit plus soutenu à partir d'un certain temps et soit abandonné empêchant ainsi à la technologie de se déployer.



Source: Gupta et al. (2006); auteurs

La figure ci-dessus rend également implicitement compte du rôle modérateur que peut jouer l'environnement - dans notre cas, le dynamisme de la politique de taxation (sa volatilité et son ampleur) dans les stratégies d'innovation. Une première lecture pourrait conduire à conclure que l'arbitrage "optimal" entre l'exploration et l'exploitation correspond au point où les probabilités des deux types d'erreurs sont égalisées. Or suivant l'environnement en vigueur, une stratégie d'exploration-exploitation donnée peut être plus ou moins appropriée pour gérer le portefeuille d'options de R&D. Autrement dit, les bénéfices et les coûts d'opportunité d'évitement des différents types d'erreurs peuvent dépendre de l'environnement dans lequel opère la firme. Dans un environnement politique stable, le bénéfice d'une stratégie de recherche par exploitation peut plus que compenser le coût d'opportunité lié à l'abandon d'un bon projet potentiel (Katila & Ahuja 2002). En revanche, si l'environnement est hautement incertain, une recherche exploratoire peut être préférable dans la mesure où le coût d'opportunité lié à l'abandon d'une option prometteuse peut largement dépasser le coût de surinvestissement dans de "mauvais" projets.

Notons que cette approche qui, pour rendre compte des défis liés à la gestion des connaissances, insiste sur l'inévitable arbitrage entre l'exploitation et l'exploration dans la gestion d'un portefeuille de projets, renvoie à une vision conflictuelle qui place les deux activités aux deux extrêmes d'un continuum en raison à la fois des contraintes de ressources et des différences de routines organisationnelles qu'elles mobilisent (Gupta *et al.*, 2006). Certaines contributions ont cependant adopté une vision alternative en insistant sur la complémentarité et les synergies entre les deux activités (He et Wong, 2004). Cette perspective alternative suggère qu'il peut ne pas forcément exister d'incompatibilité entre les deux activités et qu'elles peuvent coexister. Gupta *et al.* (2006) soulignent ainsi que dans un système faiblement couplé (*loosely coupled*), l'exploration et l'exploitation peuvent être orthogonales au sens où des niveaux élevés d'exploitation ou d'exploration à un niveau du système peuvent coexister avec des niveaux élevés d'exploration ou d'exploitation à un autre niveau du système. Dans notre cas, cette situation peut être illustrée par les différences fondamentales pouvant exister entre les règles d'allocation des ressources en amont et en aval d'un processus de R&D. Ainsi, dans la mesure où l'apprentissage, les ressources et les routines nécessaires sont différentes pour l'exploration et l'exploitation, elles peuvent être déléguées à différents groupes au sein d'une organisation ou constituer différentes étapes d'un processus de décision d'investissement permettant de passer d'une activité à l'autre. Dans ce cas la gestion de l'équilibre entre les deux activités revient à contrôler l'allocation des droits de décisions à explorer ou exploiter durant le processus de R&D. Bien évidemment lorsque les différentes étapes d'un processus sont étroitement couplées ou lorsque tout le processus est biaisé vers l'une ou l'autre des activités, l'exploration et l'exploitation peuvent entrer en conflit.

Dans la section suivante, nous considérons les déterminants organisationnels et managériaux structurant les décisions d'options dans la coordination stratégique entre la recherche par exploration-exploitation.

### **C. Chaîne d'options et agencement des critères de décision**

Les développements récents de la littérature managériale sur le raisonnement en termes d'options réelles ont mis en avant la nécessité de considérer plus précisément les facteurs organisationnels qui gouvernent les différentes étapes d'un processus d'option. Cette orientation est essentiellement motivée par le questionnement quant aux conditions adéquates d'utilisation d'une telle logique et à ses effets positifs/négatifs sur la performance des firmes.<sup>13</sup>

En nous appuyant sur ces développements récents, nous développons dans cette section un cadre conceptuel pour rendre compte des facteurs organisationnels susceptibles de structurer le raisonnement d'option et de jouer un rôle critique dans la capacité des firmes à bénéficier des gains et à limiter les coûts inhérents à une logique d'option. Nous considérons ce raisonnement à la lumière des critères de sélection, d'allocation et de contrôle qui sous-tendent le comportement managérial durant le processus d'option et qui *in fine* peuvent donner une explication possible des différences de trajectoires d'apprentissage (de résolution d'incertitude) par exploration-exploitation et de performance entre les firmes. Nous appliquons, dans la partie III, ce cadre conceptuel à la problématique de gestion d'un portefeuille d'options de R&D sur des technologies énergétiques face à la fois à un environnement technologique et une politique de taxe carbone incertains. Il s'agit ce faisant

---

<sup>13</sup> Les articles publiés dans *The Academy of Management Review* en 2004 (Vol. 29, N° 2) donnent pour un aperçu des débats autour de l'utilisation des options réelles dans un contexte organisationnel.

d'expliciter l'impact sur l'ajustement et la performance du portefeuille de projets de différents agencement de critères qui régulent le processus d'apprentissage par exploration-exploitation pour résoudre l'incertitude technologique et l'incertitude réglementaire.

Tandis que la théorie des options réelles a mis en avant l'avantage stratégique de générer un portefeuille élargi d'options sur des projets risqués et a contribué à mieux comprendre la gestion des risques et de la flexibilité notamment dans le cadre d'investissement séquentiel, certaines contributions ont surtout souligné l'importance du contexte organisationnel dans l'application d'une logique d'option. Elles mettent surtout en avant l'impact que peut avoir le *design* organisationnel sur la capacité des firmes à bénéficier de la valeur et de la flexibilité procurées par les options de R&D. Bowman et Hurry (1993) ont suggéré que les facteurs organisationnels peuvent influencer le degré d'autonomie des décideurs dans l'exercice des options détenues par la firme. Coff et Laverty (2001) ont comparé les conséquences en termes d'exercice d'options lorsque les décisions sont prises soit de manière décentralisée (autonome), soit de manière intégrée (centralisée). Ces auteurs ont suggéré que la performance de ces deux structures peut dépendre de l'environnement de la firme qui détermine l'importance des types de biais de décisions à éviter. Adner et Levinthal (2004) insistent également sur l'intérêt de mieux intégrer dans l'analyse les conflits et les disparités de perception relatifs à la valeur des options qui peuvent exister entre les différents niveaux d'une organisation, notamment entre la direction (qui détient et gère un portefeuille d'options) et les différentes unités organisées par projets (qui sont et s'identifient aux options qu'elle promeuvent). La poursuite efficace d'une logique d'option implique pour ces auteurs de concevoir des critères de décisions qui tout en imposant une discipline à la gestion des options, notamment en spécifiant des limites temporelles ou des seuils de performance au soutien et à l'abandon des projets et en allouant des droits de décisions qui restreignent l'étendue des actions possibles, ne doit pas faire perdre de vue les arbitrages stratégiques que ces critères impliquent en termes de recherche par exploration et par exploitation. Miller et Harikan (2004) ont aussi dans le cadre d'un modèle de simulation comparé, les trajectoires d'allocation des ressources des firmes entre différentes technologies en présence de trois comportements de recherche différents. En prenant comme référence le modèle de comportement normatif des options réelles, ces auteurs montrent que des critères de comportement d'investissement fondé sur le *raisonnement en termes d'option réelle* peut ne pas toujours être plus performant qu'un *comportement adaptatif évolutionnaire*. Si ce dernier conduit systématiquement à sous-estimer la valeur d'option, le raisonnement en termes d'option réelles tend à biaiser à la hausse la valeur d'option par rapport à un comportement rationnel. Enfin, Barnette (2008) établit un certain nombre de propositions sur la façon dont les différences en termes de critères de décision peuvent dans un contexte organisationnel orienter la détection, la prise, le soutien, le maintien, l'abandon et l'exercice des options au sein d'un portefeuille.

A l'instar de ces travaux, notre contribution s'intéresse plus particulièrement aux effets des variations des critères de décision sur les variations et la performance des portefeuilles d'options. Notre objectif est de mettre en avant les arbitrages inhérents à différents agencement de critères qui régulent la coordination entre les activités de recherche par exploration /exploitation et d'appréhender la façon dont ces arbitrages influencent l'évolution d'un portefeuille de projets optionnels. En effet, ces critères de décision qui jalonnent le processus d'option jouent un rôle important du fait qu'ils structurent l'allocation des ressources entre différents projets et impactent ce faisant l'efficacité avec laquelle les firmes ajustent et tirent parti de la flexibilité de leur portefeuille.

Ces critères renvoient de manière générale au degré d'autonomie dans les prises d'initiatives, à la plus ou moins grande discipline dans l'évaluation des projets, aux modalités de sélection et d'allocation des ressources entre différents projets. Ces critères peuvent concerner l'importance accordée aux projets technologiques émergents (détection et prise d'options), la stratégie d'abandon des projets (vitesse ou taux d'abandon), les procédures établissant de manière plus ou moins stricte les jalons et les conditions nécessaires ou suffisantes pour soutenir ou reporter un projet, les seuils de tolérance aux résultats d'échecs des projets en cours, les différences entre les procédures d'évaluation des projets suivant l'étape du processus d'options (Adner et Levinthal, 2004a; McGrath *et al.*, 2004; Barnett, 2008).

Ces critères qui structurent le régime de sélection, d'allocation et de contrôle le long du processus d'option sont susceptibles d'orienter de manière décisive la trajectoire de R&D de la firme en influençant, à chaque étape d'ajustement du portefeuille, la mobilisation et l'interprétation sélectives des informations sur la base desquels sont prises les décisions - détection, prise, soutien, report, abandon et exercice - d'options. Notamment, un signal sur la performance d'un projet sur lequel l'entreprise a pris une option peut, suivant les critères utilisés, provoquer différentes conjectures positives ou négatives concernant le potentiel du projet et impliquer différentes décisions possibles. Autrement dit, ces critères établissent un lien entre la représentation qu'ont les agents de leur environnement et les actions qu'ils estiment appropriées face à cet environnement. Leur rôle consiste à gouverner l'allocation des ressources en légitimant et en identifiant les projets et décisions d'options prioritaires. Ainsi, durant le déroulement du processus d'options, différents agencements de critères peuvent provoquer des différences en termes de flux et d'accumulation d'informations, de trajectoires d'apprentissage et moduler différemment la perception des décideurs sur les opportunités d'investissement et impliquer des différences notables en termes d'ajustement du portefeuille. Un agencement donné de critères peut conduire à sous-estimer certains signaux et à surestimer d'autres.

Par exemple, en amont du processus de R&D une firme peut accorder plus ou moins d'importance aux nouvelles opportunités externes à son portefeuille et être ainsi plus ou moins encline à détecter et à explorer de nouvelles technologies (propension à renouveler le portefeuille) ou à explorer/exploiter son portefeuille existant (soutien aux projets déjà existants). Aussi durant le processus répété d'évaluation de la qualité des différents projets, les critères de décisions peuvent influencer la vitesse de sélection des projets et favoriser soit le soutien d'un grand nombre de projets (propension à la recherche par exploration), soit le soutien d'un nombre restreint de projets impliquant l'abandon et le report d'un grand nombre de projets (propension à la recherche par exploitation). En aval du processus de R&D les critères peuvent différer en fonction du seuil d'incertitude à partir duquel les options sont exercées pour engager les investissements permettant de déployer le projet et raccourcir ou étendre la durée de la période d'exploration/exploitation (maturité de l'option).

Dans ce cadre, l'efficacité d'un agencement donné dépendra de la façon dont il permet de résoudre l'incertitude de l'environnement. L'adoption d'une logique d'option n'implique pas automatiquement l'adoption d'une forme organisationnelle ou d'un agencement de critères particuliers pour gérer le processus d'option (Mc Grath *et al.*, 2004; Barnette, 2008). Plutôt le choix approprié de la forme organisationnelle et des critères qui sous-tendent les décisions d'allocation des ressources dans le processus d'option est susceptible de dépendre des caractéristiques de l'environnement et de l'incertitude auxquelles font face les firmes dans la mesure où chaque mode organisationnel ou ensemble de critères régulant les décisions

d'options reflète un régime spécifique de résolution d'incertitude et d'apprentissage (Roberts et Weitzman, 1981).

Nous utilisons dans ce qui suit le concept de *chaîne d'option* (Browman et Hurry, 1993; Barnett, 2008; Burger-Helmchen, 2009) pour rendre compte de la façon dont les critères de décision qui contribuent à la coordination des activités de recherche par exploration-exploitation et qui régulent la composition et l'ajustement du portefeuille influencent la performance de la firme sous différents régimes d'incertitudes<sup>14</sup>.

Nous caractérisons le processus de décision qui structure les différentes étapes d'une *chaîne d'option* par trois ensembles de critères :

(1) Un premier ensemble de critères s'applique à l'amont du processus de R&D. Ces critères gèrent la frontière entre l'univers des technologies possibles et le portefeuille existant de la firme. Ils déterminent quels projets dans l'univers des projets technologiques possibles peuvent faire ou non l'objet d'une prise d'option (degré d'exploration en amont).

(2) Dans les limites de cette frontière qui définissent le portefeuille de R&D potentiel ou le potentiel de son renouvellement, la firme établit un second ensemble de critères intermédiaires qui gouvernent l'allocation des ressources au sein du portefeuille existant pour gérer le soutien, le report et l'abandon des options sur les projets de R&D en cours. Ces critères intermédiaires visent l'arbitrage et la coordination des activités d'exploration-exploitation au sein du portefeuille existant.

(3) Enfin, un dernier ensemble de critères concerne l'exercice final des options qui marque le passage du processus de R&D à la sélection et au déploiement d'un projet technologique. Ces critères peuvent notamment influencer la durée du processus de R&D (durée d'exploration et d'exploitation du portefeuille existant) avant un investissement irréversible sur le projet choisi pour être déployé.

Remarquons que si au sein de chaque étape les critères utilisés relèvent d'une logique d'arbitrage entre l'exploration-exploitation, l'agencement des critères le long des trois étapes de la chaîne d'options renvoie au choix stratégique de coordination entre la recherche par exploration/exploitation.

### **(1) Critères de décision et propension à explorer en amont du processus de R&D**

Durant cette étape du processus de R&D l'exploration porte sur l'environnement externe de la firme. Les critères rendent compte de la façon dont une firme estime la valeur d'option des nouveaux projets pour les intégrer ou non à son portefeuille existant (détection et prise d'options).

Le raisonnement en termes d'options réelles effectue une distinction entre les *options latentes* (*shadow options*) et les options réelles. Les options latentes définissent l'ensemble des

---

<sup>14</sup> Nous comparons différents modèles de comportement (agencement de critères de décision) qui peuvent être assimilés à différents modèles cognitifs ou de représentation conduisant chacun à une gestion spécifique du portefeuille de projets face à l'incertitude qui caractérise l'environnement. Une approche plus dynamique et certainement plus réaliste dans une perspective de long terme consisterait aussi à introduire la possibilité que les décideurs entreprennent un processus de recherche sur les critères appropriés de décisions eux-mêmes, adaptant plus ou moins efficacement leur modèle de comportement, face aux différents profils d'incertitudes.

opportunités existantes qui attendent d'être découvertes et reconnues. Elles ne peuvent devenir réelles que si la firme perçoit une opportunité stratégique (valeur d'option) la motivant à les intégrer dans son portefeuille existant (Bowman et Hurry, 1993). Par ailleurs, une des caractéristiques attribuée par la logique d'options aux firmes ayant adopté un tel raisonnement est leur propension à initier un grand nombre de nouveaux projets risqués même si par la suite de nombreux projets peuvent se révéler être des échecs (Amram & Kulatilaka, 1999). Suivant cette logique tant que les coûts de prises d'option restent limités, un taux élevé d'échecs n'est pas forcément préjudiciable dans la mesure où l'exploration est considérée comme une condition nécessaire pour détecter les opportunités à potentiel de gain élevé.

Toutefois, comme le suggère Barnett (2008) même si les firmes utilisent une logique d'option, elles peuvent varier dans leur propension à allouer des ressources à l'exploration de nouvelles opportunités. En effet, les coûts liés à l'intégration de nouveaux projets (mise en place d'une nouvelle équipe et investissements dans de nouveaux équipements) et la limitation des ressources peuvent conduire les firmes à établir des critères d'évaluation plus ou moins sévères et sélectifs concernant la prise d'option sur de nouveaux projets. Ces critères rendent compte des différences entre les firmes en termes de disponibilité de *slack* organisationnel ainsi que de tolérance, notamment, aux conséquences négatives qui peuvent résulter de ces nouvelles initiatives, à l'incertitude, aux coûts anticipés par ces initiatives, à leur prix d'exercice au moment de la prise d'option. De manière générale, la littérature économique et managériale associe la capacité de découvertes de nouvelles opportunités à la propension entrepreneuriale. Kirzner (1979) utilise le concept de *vigilance entrepreneuriale* pour traduire l'aptitude d'une firme à percevoir les opportunités non encore utilisées. Certaines firmes mettent ainsi en place des structures de veille et développent des ressources qui leur permettent de découvrir plus facilement et plus fréquemment de nouvelles opportunités.

Par conséquent, même si les firmes adoptent un raisonnement en termes d'options, suivant les critères de décisions utilisés, elles peuvent varier dans leur propension à explorer leur environnement externe et focaliser leur attention sur tout ou une partie de l'environnement ou sur différents aspects de l'environnement. Ce processus peut aboutir à la détection de différents types d'*options latentes*. De même suivant les critères retenus les firmes peuvent être plus ou moins sélectives dans leur prise d'options. Ces critères d'exploration en amont du processus de R&D déterminent ainsi la fréquence et l'ampleur des découvertes de nouvelles *options latentes* ainsi que le type de nouveaux projets approuvés. Par exemple, une firme avec une propension entrepreneuriale sera caractérisée par des critères de sélection souples favorisant une exploration élargie de son environnement et des initiatives autonomes de prise d'option sur de nouveaux projets permettant le renouvellement fréquent de son portefeuille d'options (seuils de la variance et/ou du prix d'exercice à partir desquels les nouveaux projets seront inclus dans le portefeuille seront relativement élevés ou le seuil de performance à partir duquel le projet technologique sera jugé prometteur sera relativement faible). Alors qu'une firme qui favorise l'exploration/exploitation de son portefeuille déjà existant aura tendance à explorer moins de nouvelles opportunités et aura un portefeuille d'options plus restreint de projets risqués. D'autres firmes seront susceptibles d'avoir des critères qui les positionnent entre ces deux extrêmes.

## **(2) Critères de décision régulant l'évolution du portefeuille existant**

Dans la section précédente nous avons mis en avant les dilemmes auxquels peuvent être confrontés les firmes dans l'arbitrage de leurs activités d'exploitation-exploration. Ces dilemmes peuvent conduire les firmes à adopter des approches différenciées pour gérer leur

portefeuille et que rendent compte les critères de décision mis en place pour contrôler l'allocation des ressources sur les projets de R&D en cours. Ces critères influencent les décisions de *soutien*, de *report* et d'*abandon* d'options d'une période à l'autre au sein du portefeuille existant.

L'option de *soutien* sur un projet technologique signifie que la firme continue d'une période à l'autre de financer le processus de R&D pour augmenter la probabilité de son succès en améliorant la performance de la technologie et/ou réduisant son incertitude. C'est durant ce processus de soutien que peut se poser le problème de surinvestissement dans un projet si la firme s'appuie sur des critères trop souples où même un signal indiquant un résultat anticipé mitigé peut motiver la firme en présence d'incertitude à estimer que la technologie mérite d'être soutenu en tant qu'opportunité. Pour contrer la tendance à la surenchère, les firmes peuvent mettre en place des seuils d'alerte (McGrath *et al.*, 2004). Ainsi suivant les critères de décision utilisés et leur degré de sélectivité, une firme peut être plus ou moins encline à allouer des ressources à une opportunité indiquant des résultats plus ou moins mitigés.

L'option de *report* sur un projet consiste à mettre en veille le soutien d'une période à l'autre et à le réactiver au cas où les signaux obtenus sur le projet redeviennent plus favorables. Tandis que l'option de report constitue un moyen pour les firmes de maintenir les projets dans leur portefeuille sans engager de coûts (en adoptant une position d'attente permettant de réévaluer les projets face à l'évolution de leur environnement), cette attitude passive, dans la mesure où elle ne contribue pas à l'amélioration du projet peut provoquer suivant les critères utilisés à l'abandon plus ou moins rapide du projet.

L'*abandon* a lieu lorsque la firme exclut un projet de son portefeuille et que celui-ci redevient une option *latente* sans la possibilité d'être exercé à moins d'être réintégré à une date ultérieure dans le portefeuille pour relancer le processus d'apprentissage. Les critères régulant l'option d'abandon permettent d'une part de limiter les risques de surinvestissement sur des projets faussement prometteurs tout en dégagant des marges de liberté pour l'exploration de nouveaux projets issus de l'étape (1). Une firme qui se caractérise durant l'étape (2) par des critères facilitant l'abandon des projets limite le risque de surenchère mais se heurte en même temps au risque d'abandonner trop hâtivement des projets qui auraient pu se révéler profitables à terme. Si l'abandon est privilégié face à un signal mitigé, la firme limitera les erreurs de type I. Toutefois, l'abandon rapide des projets risque parallèlement d'augmenter les erreurs de type II dont les pertes de gains associées peuvent être plus que compensées par les économies de coûts liées à la réduction des erreurs de type I. Il se peut en effet que les quelques projets erronément abandonnés deviennent des succès significatifs et que le risque d'omission puisse se révéler plus élevé que le risque de surinvestissement (McGrath, 1999).

Ainsi, durant l'étape (2) une firme avec une propension élevée à exploiter son portefeuille mettra en place un processus d'évaluation sévère caractérisé par des jalons de performance clairement établis et aura tendance à diminuer assez rapidement le nombre de projets soutenus et à augmenter sinon le nombre de projets abandonnés du moins le nombre de projets reportés d'une période à l'autre. Une firme ayant une propension à explorer son portefeuille dénotera une tendance à adopter des critères de soutien plus souples dans la mesure où les projets bénéficieront d'un appui sur des intervalles de performances estimées plus large et ne seront abandonnés que si leur niveau de performance anticipée tombe suffisamment bas.

### (3) Critères de décision relatifs à l'exercice final d'une option au sein du portefeuille

Une distinction entre les options financières et les options réelles est que ces dernières n'ont pas de date d'expiration fixée *ex ante* et de manière exogène obligeant les firme à exercer ou non leurs options. Plutôt une option réelle représente pour la firme un accès préférentiel à une opportunité d'investissement (Bowman et Hurry, 1993) que lui assurent les connaissances accumulées à travers la gestion de son portefeuille de projets.

Les modèles d'options mettent en avant la valeur à différer les investissements irréversibles tant qu'il existe une incertitude, dans la mesure où le coût supporté pour exercer l'option tend généralement à être significativement plus élevé que les investissements engagés lors de la prise et du soutien des options. En revanche, une fois que l'incertitude est résolue, le report de la décision d'exercer ou non l'option n'a plus d'intérêt (Trigeorgis, 1996).

La question demeure cependant de savoir quant est-ce qu'une firme considère l'incertitude comme résolue (Barnett, 2008). Si pour une option financière, il s'avère possible de connaître sans ambiguïté quant une option doit ou non être exercée, la perception de l'opportunité d'exercer une option réelle est largement subjective à la fois en raison du caractère endogène de l'incertitude et du jugement idiosyncratique des firmes quant à l'acceptation par le marché des produits proposés ou à la sévérité future notamment des politiques environnementales. En présence d'incertitude endogène, est-il préférable pour une entreprise de continuer à détenir et à investir dans son portefeuille d'option de R&D pour essayer de mieux révéler les mérites respectifs des différentes technologies ou investir dès qu'une des options technologiques est jugée comme viable et donc exerçable? Dans ce cas, des facteurs internes, autrement dit des critères d'exercice spécifiques aux entreprises peuvent avoir une influence importante sur la décision d'exercer ou non une option. Etant donné un niveau d'incertitude, certaines firmes peuvent décider d'exercer une option et d'autres reporter l'exercice. Ces critères d'exercice rendent compte de la façon dont les entreprises interprètent et réagissent (de manière positive ou négative) aux signaux provenant de leur environnement.

Dans la mesure où en maintenant son portefeuille de projets optionnels une firme peut accumuler davantage d'informations sur le succès ou l'échec probable des différents projets, un exercice précoce témoigne de la propension d'une firme à risquer des ressources substantielles avant la résolution de l'incertitude. Ainsi, une firme entrepreneuriale dont la confiance à *déployer* le projet technologique est élevée pourra adopter des critères permettant d'exercer plus facilement une option en présence d'information incomplète. Cette propension à exercer fera qu'une firme entrepreneuriale aura tendance à déployer un projet qu'elle perçoit comme viable plus rapidement qu'une firme dont les critères d'exercice sont plus sévères et qui maintiendra l'exploitation/exploration de son portefeuille jusqu'à baisser substantiellement ou complètement l'incertitude sur l'ensemble des projets.

## 2. Modèle de simulation de projets de R&D optionnels avec incertitudes technologique et politique : une application au cas des technologies de l'énergie

### A. Démarche générale

La firme est confrontée à un problème de choix entre plusieurs projets technologiques pour produire de l'électricité en présence à la fois d'une incertitude technologique et d'une incertitude sur la politique de changement climatique (taxe carbone). Les technologies se différencient par leur intensité d'émission en carbone ainsi que par leur degré d'incertitude technologique qui porte sur l'investissement requis pour les déployer. En outre, nous considérons que l'incertitude politique est exogène, en ce que la firme ne peut la réduire par ses actions, tandis que l'incertitude technologique est endogène et peut être réduite par l'apprentissage que réalise la firme dans le cadre de sa R&D.

Notre objectif consiste à étudier les effets de ces incertitudes sur le processus de R&D de la firme et son choix d'investissement. Le schéma ci-dessous résume notre démarche générale. Chaque technologie est un projet de R&D pour la firme, dont la valeur dépend de l'investissement à réaliser pour mettre en place la technologie et du niveau de la taxe carbone qui va influencer sur le *cash flow* que pourra générer l'installation technique. La firme cherchera au cours d'une phase de R&D (d'apprentissage) à déterminer quelle est la meilleure technologie à installer.

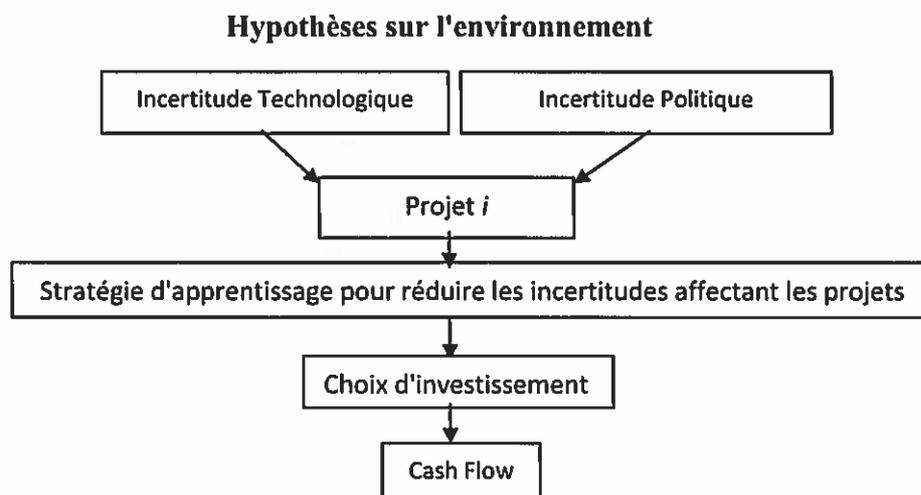


Figure 1. Structure générale du modèle

Le modèle que nous présentons ici se compose d'un environnement, constitué des différents projets ou technologies potentielles et d'une firme, caractérisée par un mécanisme d'apprentissage et un design organisationnel. Dans ce qui suit, nous présentons en détail chacune de ces composantes.

## B. L'environnement

### (a) Les technologies

L'étude retiendra des technologies suffisamment contrastées pour pouvoir rendre compte de faits stylisés dans le choix décisionnels des entreprises. Nous retiendrons quatre projets technologiques.

Parmi ces projets, deux utilisent des énergies fossiles et peuvent être respectivement assimilées à une centrale au gaz (Cycle Combiné avec Turbine à Gaz, appelé A) et une centrale au charbon (Cycle Combiné de Gazéification Intégrée, appelé B). L'intensité d'émission de carbone du projet A est supposée inférieure à celle du projet B. Nous supposons également que A possède un coût d'investissement initial plus faible que B. Toutefois, le potentiel de réduction des coûts de B sera considéré comme étant plus élevé que sur A même si ce potentiel est plus incertain.

Les deux autres technologies utilisent des énergies non carbonées et seront respectivement assimilées à l'éolienne offshore (appelé C) et au solaire photovoltaïque (appelé D). Ces technologies se différencient de la manière suivante : le coût d'investissement initial de D est plus élevé que celui de C. Il est toutefois supposé que le potentiel de réduction du coût d'investissement pour D est plus important que pour C. Même si D est plus incertain que C, il peut devenir plus avantageux à long terme si des efforts importants en R&D y sont consacrés.

### (b) Valeur nette des projets

Nous présentons dans cette section la manière dont nous représentons la valeur de chacun des projets constituant l'environnement de la firme. Dans ce modèle, la valeur d'un projet se compose du *cash flow* généré par la technologie si elle devait être mise en place moins les investissements nécessaires à son implémentation et moins les coûts qui ont été nécessaires à l'apprentissage qui a conduit à son choix. Nous présentons ces différents éléments dans ce qui suit.

Si la firme devait choisir le projet  $i$ , le *cash flow* annuel de la firme serait de:

$$CF_i^t = X_i * \left( P_E - \frac{p_i}{\eta_i} - \frac{e_i}{\eta_i} P_{CO_2}^t \right) \quad (1)$$

Dans cette formule,  $X_i$  est la production de la filière  $i$  et s'écrit  $X_i = C * \pi_i * h$ ,

Avec:

- $C$ , la capacité installée de la filière  $i$  (nous considérerons que cette capacité est la même pour toutes les technologies,  $C_i = C$ );
- $\pi_i$ , le facteur de capacité de l'unité installée ( $0 < \pi_i < 1$ );
- $h$ , le nombre d'heures de fonctionnement annuel de l'unité installée.

Par ailleurs, le *cash flow* dépend également d'un certain nombre de variables:

- $P_E$ , le prix de vente de l'électricité;
- $e_i$ , le taux d'émission de la technologie;
- $\eta_i$ , l'efficacité de la technologie ( $0 < \eta_i < 1$ );
- $p_i$ , le prix du combustible utilisé;
- $P_{CO_2}^t$ , le prix du  $CO_2$ .

Afin d'obtenir la valeur nette d'un projet, nous devons soustraire du *cash flow* le montant de l'investissement nécessaire à la mise en place de la technologie ( $F_i^T$ ) et les coûts de R&D qui ont été nécessaires pour arriver à la décision de mettre en œuvre cette technologie particulière ( $C^T$ ). L'exposant T indique le temps de R&D nécessaire à la firme pour formuler un choix de technologie à implémenter.

Ainsi, en l'absence d'incertitude, à la période T marquant la fin de la phase de R&D, la valeur nette du projet i est de

$$VN_i = X * \left( \sum_{t=T}^{T+T_i} \left( P_E - \frac{p_i}{\eta_i} - \frac{e_i}{\eta_i} P_{CO_2}^t \right) \right) - F_i^T - C^T \quad (2)$$

Où  $T_i$  représente la durée de vie de la technologie.

### (c) Les incertitudes sur la valeur des projets

Nous considérons ici que deux types d'incertitudes pèsent sur la valeur des projets. La première est l'incertitude politique, la seconde est l'incertitude technologique.

#### - *L'incertitude politique*

Nous représentons l'incertitude sur la politique de changement climatique par le niveau de la taxe carbone (noté  $P_{CO_2}^t$ ). Ce prix est incertain et son évolution au cours du temps est celui d'une matière première. Nous représentons la taxe carbone et son évolution par un processus de retour à la moyenne d'Ornstein-Uhlenbeck (Dixit et Pindyck, 1994). Une telle représentation suppose que la valeur de la matière première est constante sur le long terme. Nous pouvons observer des variations parfois importantes sur de courtes périodes de temps, mais dans une fenêtre d'observation assez longue, nous verrons les données osciller autour d'une valeur moyenne:

$$dP_{CO_2}^t = a(\mu_{CO_2} - P_{CO_2}^t)dt + \sigma_{CO_2}^t dW_{CO_2}^t \quad (3)$$

Où

- $a$  est le taux de retour vers la moyenne (la rapidité avec laquelle le processus ramènera les données vers leur valeur moyenne);
- $\mu_{CO_2}$  est la moyenne à long terme du prix du CO<sub>2</sub>;
- $\sigma_{CO_2}^t$  contrôle la volatilité du prix;
- $dW_{CO_2}^t$  est l'incrément d'un processus de Wiener<sup>15</sup>.

Nous supposons que la firme n'a pas la possibilité d'agir sur le niveau de la taxe carbone et ne peut pas plus réduire par ces efforts le niveau d'incertitude attachée à sa valeur. Cette incertitude est donc exogène à la firme et ne peut se réduire que par le passage du temps. Afin de rendre compte de cette hypothèse, nous supposons que  $\sigma_{CO_2}^t$  a la forme suivante (Roberts et Weitzmann, 1981):

$$\sigma_{CO_2}^t = k_{CO_2}(T - t)^{\nu_{CO_2}}; k_{CO_2} > 0 \text{ et } 0 < \nu_{CO_2} < 1 \quad (4)$$

Où:

- $k_{CO_2}$  contrôle la valeur de l'incertitude à  $t = 0$ ;
  - $\nu_{CO_2}$  contrôle la forme de la réduction de l'incertitude ( $\nu_{CO_2} = 1$  correspondant à une réduction linéaire de l'incertitude);
  - $T$  est la date de fin de la phase de R&D. A cette date, toute l'incertitude environnementale est résolue.
- *L'incertitude technologique*

Outre l'incertitude politique, la firme est confrontée à une incertitude technologique. Cette incertitude porte sur le niveau d'investissement nécessaire à la mise en place des différentes technologies. Le changement incertain du coût d'investissement  $F_i$  d'une période à l'autre suit une trajectoire de mouvement arithmétique Brownien :

$$dF_i^t = -\lambda_i^F dt + \sigma_i^F dW_{Fi}^t \quad (5)$$

$\lambda_i^F$  représente le taux de réduction moyen des coûts d'investissement de la technologie  $i$  dont la firme pourra bénéficier *via* ses activités de R&D avant d'investir,  $\sigma_i^F$  représente le paramètre de variance des coûts et  $dW_{Fi}^t$  est l'incrément d'un processus de Wiener.

---

<sup>15</sup>  $W(t)$  est une variable aléatoire normalement distribuée,  $dW(t)$  est la variation de  $W(t)$  sur un court intervalle de temps. Un processus de Wiener a les propriétés suivantes: (i)  $W(0)=0$ ; (ii)  $W(t+s) - W(t)$  est normalement distribué avec une moyenne de zéro et une variance de  $s$ ; (iii)  $W(t+s_1) - W(t)$  est indépendant de  $W(t) - W(t - s_2)$ , où  $s_1 > 0$  et  $s_2 > 0$ .

Nous faisons deux hypothèses qui sous-tendent le choix de notre formulation. Premièrement, nous supposons toutes les connaissances acquises pendant la phase de R&D permettent de mieux maîtriser les risques et de mieux identifier les verrous technologiques liés aux développements d'une technologie. En d'autres termes, nous supposons que l'apprentissage sur une technologie permet de réduire le montant d'investissement qu'il faudra faire au moment de la décision. Ceci justifie le signe "-" que nous avons placé devant  $\lambda_i^F$ . Deuxièmement, nous supposons que, contrairement au cas de l'incertitude politique, la firme peut réduire l'incertitude technologique  $\sigma_i^F$  attaché à chaque technologie par l'apprentissage qu'elle conduit durant sa phase de R&D.

Afin de discriminer les différents projets, tout en évitant de trop compliquer les solutions numériques, nous supposons  $\lambda_A^F < \lambda_B^F < \lambda_C^F < \lambda_D^F$ ,  $\sigma_A^F = \sigma_B^F = \sigma_C^F = \sigma_D^F$  et  $F_A^0 < F_B^0 < F_C^0 < F_D^0$ .

### C. L'organisation de la R&D : apprentissage et décision

Nous supposons une firme confrontée à l'environnement constitué par ces différents projets technologiques. Son objectif est de déterminer le meilleur projet dans lequel investir. Pour ce faire, elle doit s'engager dans un processus d'apprentissage qui lui impose de trouver le bon équilibre entre se concentrer sur un projet donné pour réduire l'incertitude qui lui est associé et en faire une évaluation la plus juste possible et essayer le plus de projets possibles afin de ne pas risquer de manquer une opportunité.

D'une manière générale, la firme apprend sur les différentes technologies durant une phase de R&D qui peut durer jusqu'à la date  $T$  au plus tard. Durant cette étape, elle estime les valeurs nettes espérées des différents projets:

$$E(VN_i) = XE \left\{ \sum_{t=T}^{T+T_i} \left( P_E - \frac{p_i}{\eta_i} - \frac{e_i}{\eta_i} P_{CO_2}^t \right) - F_i^T \right\} - C^T \quad (6)$$

Lorsqu'elle estime avoir une connaissance suffisamment précise des différentes technologies, elle choisit celui ayant la plus haute valeur nette espérée et le met en œuvre. Elle reçoit alors en récompense le "vrai" *cash flow* généré par la technologie durant toute sa durée de vie moins le montant de l'investissement et moins les coûts de R&D qui ont été nécessaires pour arriver à la décision (calculé suivant (2)). Si la firme arrive à un niveau de certitude suffisant pour prendre une décision avant la date  $T$ , elle arrête alors la phase de R&D et économise sur les coûts de R&D. Inversement, si à  $T$  la firme n'a pas suffisamment levé l'incertitude pour pouvoir prendre une décision, alors elle ne mettra en œuvre aucune technologie et ne générera aucun *cash flow*, mais subira quand même les coûts de R&D.



$$Q_i^{t+1} = Q_i^t + \alpha[VN_i^t - Q_i^t] \text{ Avec } 0 < \alpha \leq 1 \quad (8)$$

Dans ce processus,  $\alpha$  représente le poids de la nouveauté: Plus  $\alpha$  est élevé, plus les nouveaux éléments auront de l'importance dans l'estimation que l'organisation forme sur son environnement. Alternativement,  $\alpha$  peut également être vu comme la taille de la mémoire de la firme. Plus  $\alpha$  sera petit, plus les éléments contribueront longtemps à l'estimation de la valeur d'un projet<sup>16</sup>.

La figure suivante représente graphiquement le flux des données observées par la firme sur un projet donnée (en noir) et l'estimation qu'elle s'efforce de construire (en rouge). Jusqu'à la période  $T$  (au plus tard), la firme fait des observations sur la valeur de la taxe carbone et celle du montant d'investissement et calcule une valeur nette "instantanée". Elle utilise cette valeur pour construire une moyenne glissante (sur un nombre de périodes déterminé par  $\alpha$ ), via l'usage des  $Q_i^t$  de la valeur nette du projet  $i$ . Notons que la firme peut commettre une erreur dans son estimation. Ainsi, si elle observe une série de valeurs décroissantes, elle peut en déduire que la tendance de long terme de la valeur nette est décroissante, alors qu'il ne s'agit en fait que d'un phénomène temporaire.

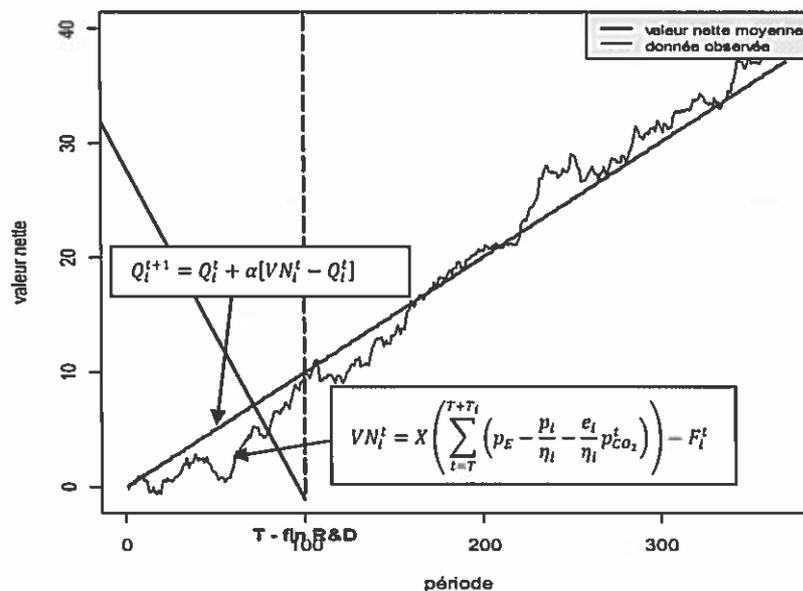


Figure 3. Exemple d'un projet et de son estimation par la firme

<sup>16</sup> Dans la mesure où notre problème est non stationnaire, nous prenons  $\alpha$  constant afin d'éviter une convergence induite (pour une discussion plus approfondie sur le sujet, voir par exemple Sutton et Barto, 1998).

## (b) Management du portefeuille de technologies

La section qui précède a présenté la manière dont la firme construit une estimation de la valeur d'un projet. Cependant, la firme gère non pas un mais plusieurs projets simultanément. Elle doit donc se doter de mécanismes adaptés à la gestion d'un portefeuille d'options.

Nous considérons ces mécanismes comme pouvant prendre place à deux niveaux organisationnels. Au niveau stratégique, la firme doit pouvoir décider de la structure de son portefeuille d'option. Nous retenons à cet égard deux aspects importants. Elle doit d'une part pouvoir décider quels projets elle conserve dans son portefeuille et quels projets elle abandonne. D'autre part, elle doit pouvoir décider quand arrêter le processus de R&D et prendre une décision d'investissement. Au niveau opérationnel, elle doit pouvoir effectivement utiliser son portefeuille d'option pour acquérir des connaissances sur les différentes technologies optionnelles.

Afin de spécifier les variables organisationnels, tant stratégiques qu'opérationnels, nous nous appuyons sur la distinction entre exploitation et exploration. Ici, l'exploitation consiste à choisir de se focaliser sur une technologie sur laquelle la firme a déjà accumulé beaucoup d'information et qui semble promettre un *cash flow* satisfaisant. Une firme qui se focalise sur l'exploitation aura tendance à accorder moins d'importance aux technologies de son portefeuille qu'elle connaît moins. Par contraste, une firme exploratoire va prendre le risque de donner une importance relativement importante aux projets peu connus.

Dans ce qui suit, nous présentons, en commençant par le niveau opérationnel, la manière dont nous utilisons les concepts d'exploration et d'exploitation pour caractériser les mécanismes organisationnels qui guident l'apprentissage sur un portefeuille de projets technologiques.

### - *Gestion du portefeuille technologique au niveau opérationnel*

Au niveau opérationnel, la firme cherche à faire le meilleur usage possible du portefeuille d'option dont elle dispose. Afin d'arbitrer l'allocation des ressources entre les différents projets plus ou moins connus, la firme s'appuie sur ses connaissances actuelles sur son portefeuille, qui sont résumées par les  $Q_i^f$ . Pour la firme, un  $Q_i^f$  élevé signifie que le projet  $i$  est potentiellement intéressant, tandis qu'un  $Q_i^f$  faible signifie que la firme devrait le laisser de côté. Rappelons que les  $Q_i^f$  sont des estimations que fait la firme et peuvent ne pas représenter la réalité: la firme peut commettre une erreur d'estimation. Pour la firme, il y a deux tactiques extrêmes à suivre. Elle peut choisir de ne se concentrer que sur les projets *a priori* bons (c'est-à-dire avec des valeurs  $Q_i^f$  élevées) et de sélectionner ceux-ci systématiquement, laissant de côté les projets *a priori* mauvais, concentrant ainsi ses ressources sur quelques projets. A l'inverse, la firme peut décider d'apprendre sur l'ensemble de son portefeuille, sur les projets *a priori* bons comme *a priori* mauvais dans l'espoir que ces derniers se révèlent finalement de meilleures options que ce qui est actuellement estimé. Nous qualifions la première tactique d'exploitation car la firme cherche à minimiser ses risques et se concentre sur des projets qui sont à la fois connus et estimés bons. Nous qualifions la deuxième approche d'exploration car la firme prend le risque de diluer l'allocation de ses ressources dans l'espoir qu'un projet inconnu ou jugé mauvais se révèle un bon candidat.

Nous représentons ces différentes tactiques d'une manière simple en tirant une probabilité  $p$  de choisir l'option  $i$  dans une distribution uniforme et fixons un paramètre  $\tau$ . Si  $p \leq \tau$ , alors la firme choisira au hasard un projet dans son portefeuille. Si au contraire  $p > \tau$  alors la firme choisira le projet ayant le  $Q_i^t$  le plus élevé (Sutton et Barto, 1998). Un  $\tau$  élevé a pour effet de rendre l'organisation indifférente aux performances passées. Elle choisit donc des options aléatoirement, sans considérations de leur valeur intrinsèque. Un  $\tau$  élevé reflète donc l'inclination de l'organisation pour l'exploration et la prise de risque. Inversement, un  $\tau$  faible pousse l'organisation à favoriser les options choisies dans le passé qui offre une promesse de gains élevés.

- *Gestion du portefeuille technologique au niveau stratégique*

Les choix au niveau opérationnel n'ont aucune influence sur la structure du portefeuille d'options. Dans ce qui suit, nous présentons les deux mécanismes (renouvellement du portefeuille et décision d'investissement) par lesquels la firme peut influencer sur le contenu de son portefeuille technologique.

Nous supposons que, en raison de ces limites en termes de ressources, l'entreprise ne peut, à un instant donné, avoir que  $n$  technologies dans son portefeuille parmi les  $m$  existantes dans son environnement ( $1 < n < m$ ).

*Modification de la structure du portefeuille*

La détermination des niveaux relatifs d'exploration et d'exploitation ne suffit pas à décrire complètement les procédures de décision de la firme en environnement incertain. La firme doit également disposer de procédures de renouvellement de son portefeuille technologique. En particulier, elle doit être dotée d'une capacité à prendre des options sur de nouveaux projets et, inversement, d'une capacité à abandonner des projets présents dans son portefeuille (Adner et Levinthal, 2004; Barnett, 2008).

Lorsqu'une entreprise choisit d'intégrer un nouveau projet dans son portefeuille, elle le fait à un coût  $c_2$ . Nous posons  $c_2 > c_1$  car investir dans une technologie complètement nouvelle suppose des coûts supplémentaires par rapport à la poursuite d'un projet de R&D déjà lancé. Le coût total de la phase de R&D,  $C^T$ , sera donc

$$C^T = \sum_{t=0}^{t=T'} c_{1,2} \tag{9}$$

où  $T'$  est la date à laquelle la firme choisit d'arrêter son processus de R&D ( $T' \leq T$ ).

Les entreprises ont une plus ou moins grande capacité (et/ou volonté) à scruter l'environnement à la recherche de nouvelles opportunités. Afin de rendre compte de cette aptitude, nous introduisons une probabilité  $P$  qui représente la capacité des firmes à chercher de nouvelles opportunités technologiques dans leur environnement<sup>17</sup>. Ainsi, une firme donnée

---

<sup>17</sup>  $P$  suit une loi uniforme  $U[0,1]$ .

sélectionnera aléatoirement un projet dans son environnement (parmi les  $m - n$  disponibles). Le projet ainsi choisi sera immédiatement intégré dans le portefeuille technologique, dans la mesure où nous supposons que la firme n'a aucun moyen d'en évaluer la valeur *a priori*.

La firme doit également être capable d'abandonner un projet qui lui semble peu prometteur et dont le maintien dans le portefeuille est consommateur de ressources. Nous supposons que la firme supprime les projets les moins performants de son portefeuille. Ainsi, à chaque pas de temps, la firme compare les valeurs estimées de chaque projet et supprime le plus mauvais si celui-ci a une valeur inférieure à un certain montant du meilleur projet: le projet  $i$  est abandonné si  $Q_i^t \leq \gamma \max_{j \in [1, n]}(Q_j^t)$ , où  $\gamma$  est le niveau en-deçà duquel la firme juge le projet trop mauvais pour être conservé dans son portefeuille.

Dans un souci de simplicité, nous supposons que la firme à une taille de portefeuille constante. Ainsi, la firme remplacera avec une probabilité  $p$  les projets qui vérifient  $Q_i^t \leq \gamma \max_{j \in [1, n]}(Q_j^t)$ .

### *Décision d'investissement*

Le moment de la décision d'investissement ( $T$ ) va dépendre de l'incertitude associée aux différentes technologies. En effet, lorsque toute l'incertitude est résolue, le choix de la meilleure solution pour la firme est immédiat. La firme est confrontée à deux incertitudes, une incertitude politique et une incertitude technologique.

L'incertitude politique sur le montant moyen de la taxe carbone à long terme est exogène et ne peut se résoudre que par le passage du temps suivant (4). La firme devra donc attendre que l'incertitude politique  $\sigma_{CO_2}^t$  soit suffisamment réduite avant de prendre une décision.

Au contraire, l'estimation de l'incertitude technologique est une perception subjective (Barnett, 2008) et est associée au processus d'apprentissage conduit par la firme plutôt qu'observée objectivement. En conséquence, la firme doit être dotée d'un processus lui permettant d'évaluer l'incertitude technologique qu'elle associe à chaque projet. Nous supposons donc que, après chaque apprentissage, la firme fait une évaluation de l'erreur qu'elle commet dans l'évaluation du montant de l'investissement. Pour ce faire, la firme construit une valeur  $Q_{F_i}^t$  de la même manière qu'en (8):

$$Q_{F_i}^{t+1} = Q_{F_i}^t + \alpha [F_i^t - Q_{F_i}^t] \quad (10)$$

$Q_{F_i}^t$  est l'estimation du montant de l'investissement nécessaire à la mise en œuvre de la technologie  $i$ . Cette valeur est construite à partir des observations  $F_i^t$  issues de (5). Sur la base de cette valeur, la firme calcule ensuite

$$\varepsilon_i^{t+1} = \varepsilon_i^t + \beta (|F_i^{t+1} - Q_{F_i}^t| - \varepsilon_i^t) \quad (11)$$

Où  $\varepsilon_i^t$  est l'estimation de l'erreur faite sur  $Q_{F_i}^t$  d'un projet  $i$  à la période  $t$ ,  $\beta$  est le paramètre contrôlant le poids de la nouveauté et  $|F_i^{t+1} - Q_{F_i}^t|$  est la quantité par laquelle l'erreur estimée est réduite<sup>18</sup>.

En outre, la firme peut être plus ou moins sensible à l'incertitude : certaines firmes peuvent vouloir attendre que toute l'incertitude soit résolue avant de prendre une décision, tandis que d'autres peuvent accepter d'investir dans une situation de forte incertitude. Afin de capturer ces différents comportements, nous introduisons un seuil  $\varepsilon_0$  tel que la firme ne choisit un projet  $i$  que si

$$\varepsilon_i^t + \sigma_{CO_2}^t \leq \varepsilon_0 \quad (12)$$

Le décideur peut choisir une technologie dès que la somme de l'erreur estimée sur l'incertitude technologique et de l'incertitude politique passe sous son seuil de tolérance à l'incertitude. Cela signifie également que la firme peut décider d'investir à n'importe quel moment entre  $t = 0$  et  $t = T$ , aussitôt que l'incertitude est perçue comme suffisamment réduite. Plus la firme investit vite, plus ses coûts de R&D seront faibles, mais, inversement, plus le risque d'erreur sera grand. Inversement, il peut arriver qu'à  $t = T$  l'incertitude reste trop élevée pour pouvoir prendre une décision. Auquel cas, la firme ne prendra aucune décision, ne mettra en place aucune technologie et ne générera aucun *cash flow* (mais aura payé les coûts de R&D).

Enfin, pour compléter les modalités de choix d'investissement, la firme a un seuil d'exercice  $Q_{Th}$ . En d'autres termes, la firme n'investira dans une technologie  $i$  que si toute l'incertitude sur le projet considéré est réduite sous  $\varepsilon_0$  et si

$$Q_i^t \geq Q_{Th}. \quad (13)$$

Lorsque l'entreprise s'estime prête à investir, elle choisit dans son portefeuille la technologie qui semble lui garantir les futurs *cash flows* les plus élevés. En conséquence, l'entreprise sélectionne la technologie associée au  $Q^*$  tel que

$$Q^* = \max_{i \in [1, n]} (Q_i^t) \quad (14)$$

Une fois la décision prise, l'entreprise met en place la technologie choisie et reçoit la vraie récompense (calculé avec les "vrais" montant de la taxe carbone et niveau d'investissement requis).

---

<sup>18</sup> Pour une justification de l'utilisation de ce mécanisme, voir par exemple Wilson (1998).

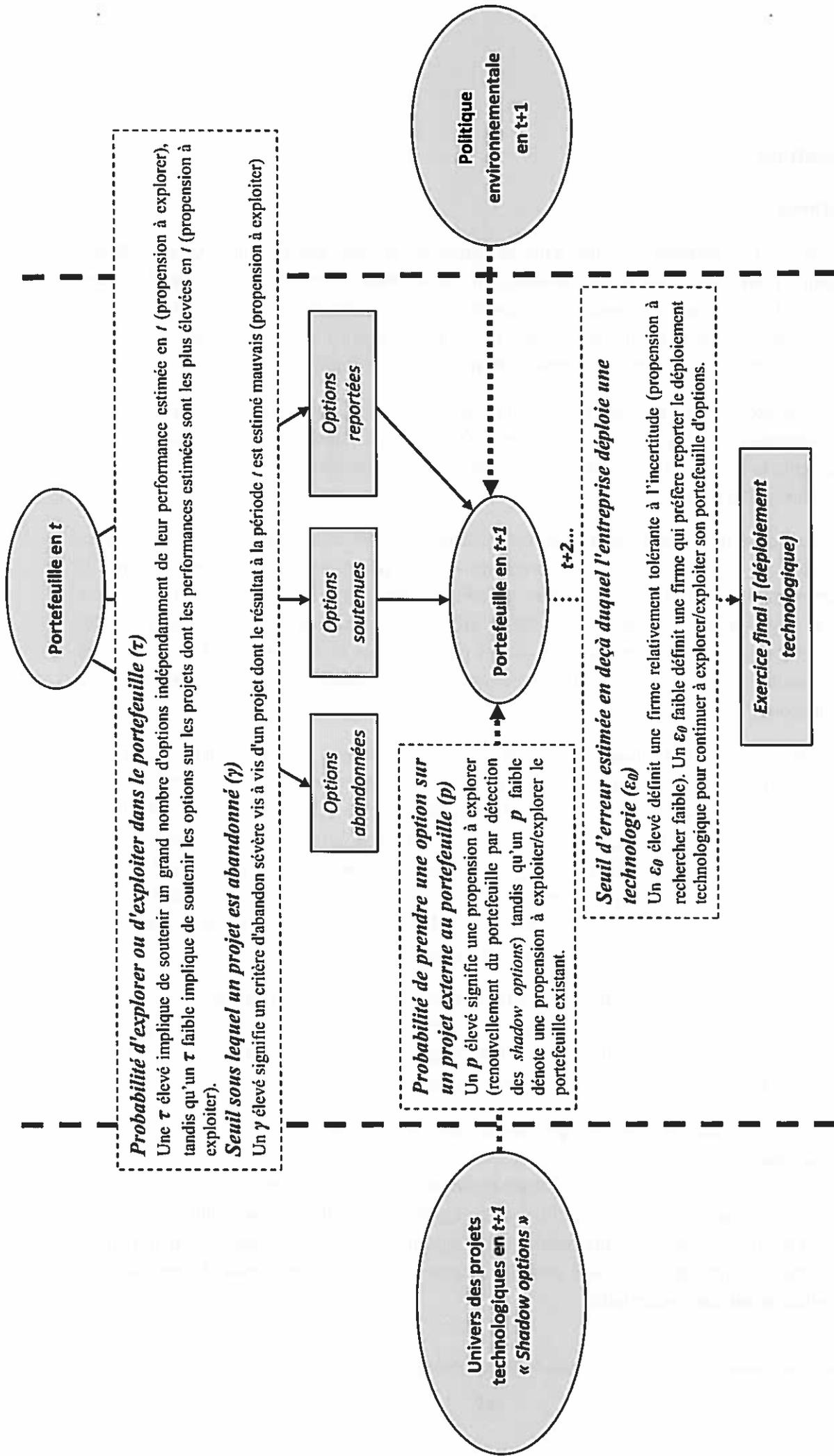


Figure 4 : Chaîne d'options et dynamique de composition et d'évolution du portefeuille

## D. Résultats

### (a) Méthode

Afin d'analyser le modèle présenté dans la partie précédente, nous avons exécuté 200000 simulations numériques, en tirant aléatoirement pour chacune les valeurs de nos différents paramètres. De cette manière, nous avons constitué une base de données couvrant l'ensemble de l'espace des paramètres. Une telle approche est dans l'esprit d'un tirage Monte Carlo nous permettant de déterminer numériquement la forme de la distribution de nos paramètres.

Nous avons fixé la durée maximale de la phase de R&D à 100, chaque période constituant un mois. L'organisation peut arrêter sa décision à n'importe quel moment entre les périodes 0 et 100. Lorsque la firme a arrêté son choix sur un projet, la valeur de celui-ci est calculée<sup>19</sup> et constitue la performance de la firme.

Nous avons dans un premier temps cherché à déterminer des zones particulières de l'espace des paramètres, dans lesquels les combinaisons de paramètres nous permettraient de caractériser des formes organisationnelles spécifiques. Pour ce faire, nous avons recouru aux arbres de régression (Breiman *et al.*, 1984) afin d'avoir une première représentation des interactions entre les différentes variables et des performances résultantes. Sur la base de cette première analyse, nous avons identifié les paramètres clés permettant de définir une typologie des formes organisationnelles.

Les paramètres organisationnels sont ceux que nous avons présentés dans la section précédente. Au niveau stratégique, niveau auquel la firme peut manipuler la structure de son portefeuille technologique, nous retenons  $P$ , la propension à renouveler le portefeuille de projet de la firme et  $\epsilon_0$ , le seuil d'incertitude sous lequel la firme s'estime prête à investir, mettant par là fin à la phase d'apprentissage. Au niveau opérationnel, niveau auquel la firme gère le portefeuille existant, nous retenons le paramètre  $\tau$  qui contrôle la propension de la firme à explorer son portefeuille technologique. Les valeurs des autres paramètres sont maintenues constantes et sont précisées dans les tableaux de l'Appendice 1.

Nous regardons les effets qu'ont ces différents paramètres sur la performance de la firme lorsque celle-ci est confrontée à différents environnements. Dans la mesure où nous nous focalisons sur l'impact des politiques environnementales, nous présentons ci-dessous les résultats de la firme lorsque celle-ci est confrontée successivement à :

- Un environnement sans politique environnementale (c'est-à-dire où il n'y a pas de taxe carbone);
- Un environnement avec une politique écologique constante et certaine;
- Un environnement avec une politique écologique constante mais incertaine;
- Un environnement avec une politique écologique qui se durcit progressivement dans le temps (le montant de la taxe carbone augmente dans le temps) mais à laquelle n'est attachée aucune incertitude;

---

<sup>19</sup> La valeur est calculée entre  $t=100$  et  $t=$ la date de fin de vie de la technologie.

- Un environnement avec une politique écologique qui se durcit progressivement dans le temps et qui est en outre incertaine, mais cette incertitude se réduit par le passage du temps.

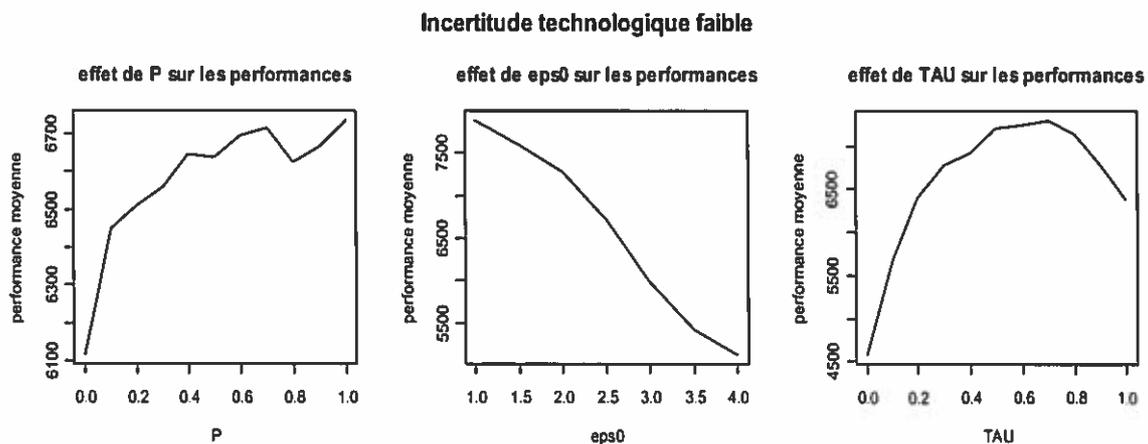
### (b) Comportement de l'organisation en l'absence de politique environnementale

Afin de comprendre le rôle des différents paramètres étudiés ainsi que leurs interactions, nous commençons par présenter le cas où la firme est confrontée à un environnement caractérisé par une absence de politique environnementale (il n'y a pas de taxe carbone). Toutefois, l'incertitude technologique demeure.

Dans ce qui suit, nous étudions les performances moyennes atteintes pour différentes valeurs de  $P$ ,  $\epsilon_0$  et  $\tau$  successivement dans le cas où l'incertitude technologique est faible et celui où cette incertitude est forte (rappelons que pour simplifier, nous associons la même incertitude à toutes les technologies).

#### - *Incertitude technologique faible*

Les graphes ci-dessous présentent les performances moyennes obtenues par la firme dans un environnement caractérisé par une incertitude technologique faible.



**Figure 5.** Performances moyennes atteintes en l'absence de politique environnementale, lorsque l'incertitude technologique est faible

La meilleure configuration organisationnelle dans cette situation est un  $P$  élevé, un  $\epsilon_0$  faible et  $\tau$  relativement élevé (sans toutefois être maximum). En d'autres termes, en l'absence de politique environnementale et lorsque l'incertitude technologique est faible, la firme doit renouveler fréquemment son portefeuille de projets; attendre que l'incertitude attachée à la valeur des projets soit réduite au maximum; explorer assez intensivement son portefeuille de projets.

Lorsque l'incertitude est faible, il est relativement aisé pour la firme de la réduire rapidement. En conséquence, une exigence élevée en terme de réduction de l'incertitude avant de prendre une décision ( $\epsilon_0$ ) est tenable et permet de réduire les erreurs commises dans les évaluations des différents projets. Un  $\epsilon_0$  petit permet donc de faire des évaluations plus précises des différents projets candidats. Il peut cependant arriver que la firme n'arrive pas à réduire suffisamment l'incertitude pour satisfaire à cette exigence. Dans ce cas, la firme ne prend pas de décision et subit les coûts de R&D sans générer de *cash flow*, mais ce coût reste cependant moins élevé que celui résultant de la sélection d'un mauvais projet. A l'inverse, un  $\epsilon_0$  élevé pousse à la sélection de projets alors que l'incertitude entourant leur valeur reste élevée et conduit donc à de nombreuses erreurs et à la sélection de "mauvais" projets, ce qui explique les performances plus faibles obtenues pour les grandes valeurs de  $\epsilon_0$ .

Exiger d'attendre que toute l'incertitude soit réduite avant de prendre une décision donne en outre à la firme le temps d'explorer l'ensemble des projets qu'elle a en portefeuille. Un niveau d'exploration ( $\tau$ ) relativement élevé, couplé à un  $\epsilon_0$  petit, permet donc d'améliorer les performances en garantissant qu'aucun projet potentiellement valable ne sera laissé de côté. Un petit  $\tau$  correspond à une tactique de pure exploitation du portefeuille courant. La firme ne se concentre dans ce cas que sur un projet. Le risque que ce projet ne soit pas le meilleur est élevé et conduit donc à des performances relativement mauvaises. Notons cependant que  $\tau$  maximum conduit à des performances plus faibles que le maximum. Ceci est dû au fait que trop d'exploration distrait trop de ressources même dans cet environnement simple. En conséquence, la firme ne réduit pas suffisamment l'incertitude sur les projets et arrive à des situations où elle ne prend pas de décision.

Les performances maximales sont atteintes lorsque le portefeuille technologique de la firme est renouvelé fréquemment ( $P$ ). Ceci assure qu'aucun projet de l'environnement n'est négligé. Notons cependant ici le rôle de  $\gamma$  (le seuil de valeur sous lequel un projet est supprimé du portefeuille). Il garantit que les bons projets ne sont pas supprimés du portefeuille. En conséquence, au bout d'un certain temps, les bons projets sont conservés dans le portefeuille et seuls les projets mauvais sont renouvelés, ce qui garantit une certaine stabilité de la population des bons candidats.

- *Incertitude technologique forte*

Lorsque l'incertitude technologique est forte, la configuration optimale est différente du cas précédent, comme le montre les graphes ci-dessous.

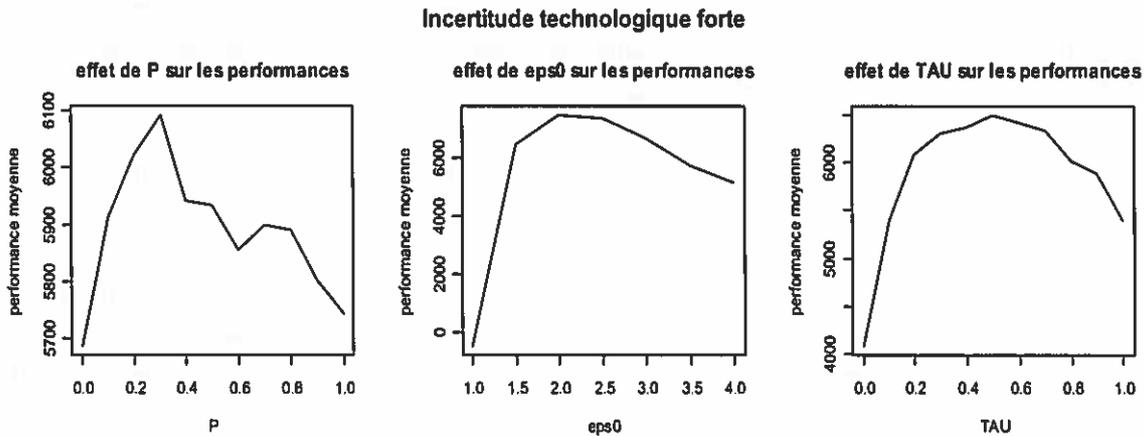


Figure 6. Performances moyennes atteintes en l'absence de politique environnementale, lorsque l'incertitude technologique est forte

Dans ce cas, la meilleure attitude est de ne pas renouveler trop fréquemment son portefeuille de projets ( $P$  relativement faible), d'avoir un moindre niveau d'exigence en termes de réduction de l'incertitude avant la prise de décision ( $\epsilon_0$  plus élevé) et d'explorer moins intensivement le portefeuille technologique existant ( $\tau$  moins élevé).

Contrairement au cas précédent, lorsque l'incertitude est élevée, il est difficile pour la firme de la réduire complètement. En conséquence, un  $\epsilon_0$  trop faible conduit systématiquement à une non-décision et ne génère aucun *cash flow*. Il est donc plus avantageux pour la firme de réduire ses exigences en terme de réduction de l'incertitude afin de pouvoir prendre des décisions, même en courant le risque de se tromper (notons néanmoins qu'un  $\epsilon_0$  trop élevé conduit à un grand nombre d'erreurs et fait baisser la performance).

Afin de limiter les risques d'erreurs induits par la nécessité de prendre des décisions en situation d'incertitude relativement élevée, la firme doit limiter les changements trop fréquents dans la structure de son portefeuille ( $P$  relativement faible). En effet, des changements trop fréquents ralentissent d'autant l'apprentissage et la réduction de l'incertitude et conduisent à la sélection de mauvais projets.  $P$  ne doit cependant pas non plus être trop petit car alors des projets potentiellement intéressants existants dans l'environnement sont ignorés, ce qui conduit à des choix sous-optimaux.

Le niveau d'exploration du portefeuille existant,  $\tau$  est plus faible que dans le cas de l'environnement caractérisé par une incertitude faible. Ceci permet de réaliser l'apprentissage et la réduction de l'erreur de manière à pouvoir satisfaire à l'exigence  $\epsilon_0$  de réduction de l'incertitude avant décision. Il demeure cependant assez élevé de manière à éviter de se focaliser trop rapidement sur une solution sous-optimale.

## - Synthèse

Ces premiers résultats montrent que dans la gestion de leur portefeuille d'options, les firmes doivent prendre en compte les interactions entre les différentes caractéristiques organisationnelles, tant au niveau stratégique qu'opérationnel. En outre, ces résultats montrent que différents environnements requièrent des combinaisons spécifiques des paramètres organisationnels. Lorsque l'incertitude est faible, la firme doit avant tout chercher à réduire les erreurs qu'elle commet dans l'évaluation des projets. En conséquence, elle doit avoir une exigence élevée en termes de réduction de l'incertitude avant de prendre une décision et doit s'assurer qu'elle a bien couvert l'ensemble des projets potentiels. Ceci n'est bien sûr possible que parce que l'environnement est suffisamment stable pour lui permettre de déployer un apprentissage aussi systématique de son environnement. Lorsque l'environnement est plus incertain, la firme doit avant tout s'assurer qu'elle peut prendre une décision. Elle doit alors renoncer à son exigence de certitude. Pour limiter les risques induits, elle doit cependant chercher à explorer un nombre raisonnable de projets. Ces premiers éléments indiquent qu'il n'y a pas une heuristique optimale qui satisferait à l'ensemble des contraintes environnementales que peut rencontrer une firme. Au contraire, la firme doit adapter son organisation interne pour pouvoir gérer ses différentes options en fonction de l'environnement auquel elle fait face.

### (c) Comportement de l'organisation lorsque la politique environnementale est constante et certaine

Nous introduisons ici une politique environnementale sous la forme d'une taxe carbone<sup>20</sup>. Dans un premier temps, nous considérons une taxe carbone constante et certaine  $P_{CO_2}$ . Dans ce cas simple, l'effet principal de la taxe carbone est de modifier la valeur des projets. En effet, les projets technologiques carbonés doivent maintenant intégrer le prix du  $CO_2$  dans le calcul de leur cash flow, réduisant ainsi ces derniers (Eq. 2). Dans le tableau ci-dessous, nous fournissons les valeurs des projets en présence et en absence de politique environnementale, avec  $P_{CO_2} = 35$  €/tonne de  $CO_2$ .

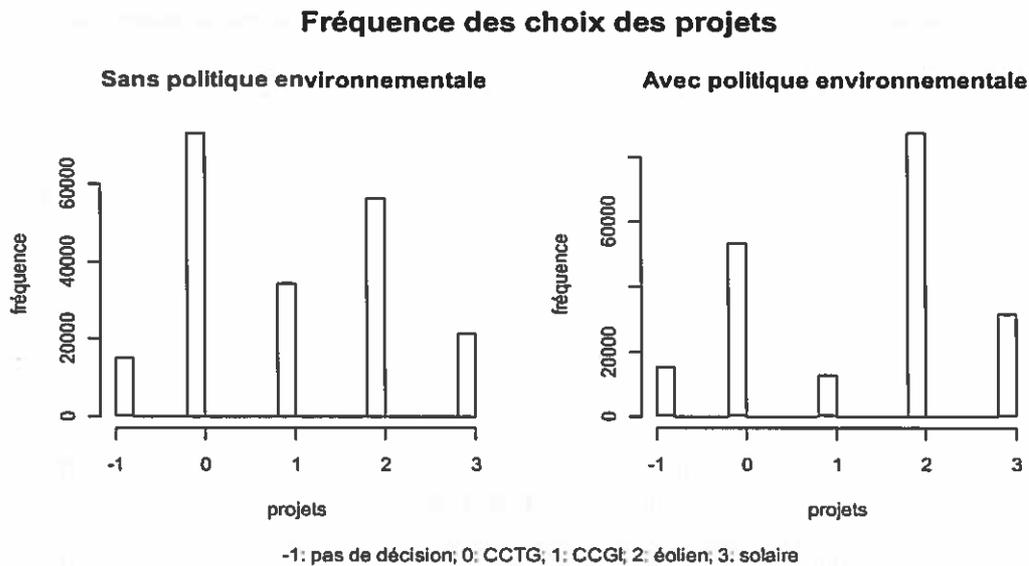
Projets	Valeur en l'absence de politique environnementale	Valeur en présence de politique environnementale
CCTG	9654	3444
CCGI	1063	-1655
Eolien	9510	9510
Solaire	-1480	-1480

**Tableau 1.** Valeur net des projets en présence et en absence de politique environnementale

Cette modification dans les valeurs des projets, spécifiquement la réduction de la valeur des projets autour des technologies émettant du  $CO_2$ , n'influe pas fondamentalement sur le

<sup>20</sup> L'incertitude technologique moyenne dans la suite de la présentation des résultats est de 2.5.

comportement de l'organisation, qui reste semblable à celui décrit ci-dessus. Dans les deux cas, la firme choisit le plus fréquemment le projet offrant la plus grande valeur nette. L'effet principal est dans la modification des fréquences de sélection des différents projets. Comme le montre la figure ci-dessous, la technologie la plus fréquemment choisie en l'absence de taxe carbone est le cycle combiné avec turbine à gaz (CCTG), alors qu'en présence d'une taxe carbone, la technologie la plus fréquemment choisie est l'éolien *offshore*.



**Figure 7.** Valeur net des projets en présence et en absence de politique environnementale

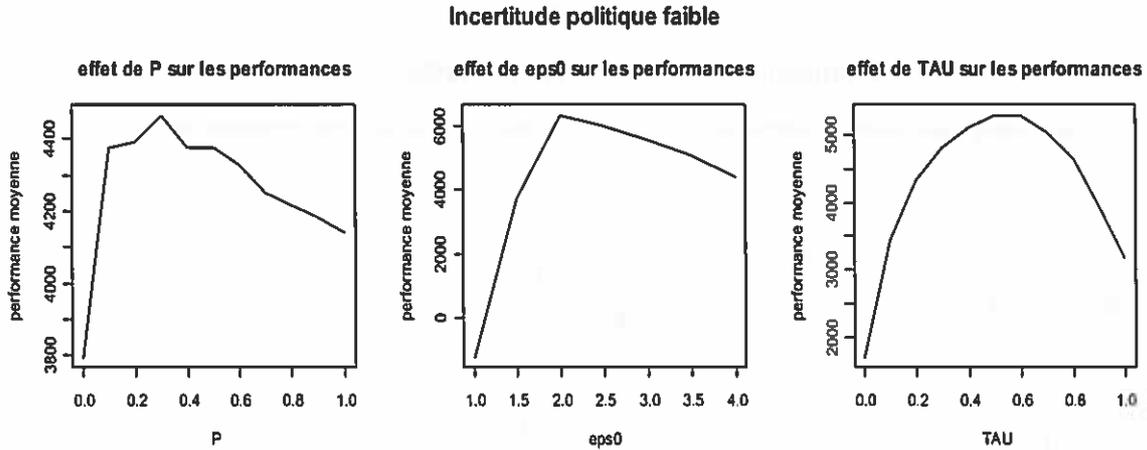
**(d) Comportement de l'organisation lorsque la politique environnementale est constante mais incertaine**

Nous considérons maintenant que la politique environnementale se traduit par une taxe carbone constante, comme dans le cas précédent ( $P_{CO_2} = 35 \text{ €/tonne de } CO_2$ ), mais cette taxe est maintenant incertaine: il existe une incertitude  $\sigma_{CO_2}$  constante, qui ne se réduit pas avec le passage du temps.

L'incertitude environnementale est exogène pour la firme. Cette dernière ne peut pas réduire l'incertitude environnementale par son apprentissage. En conséquence, dans le cas considéré ici, l'incertitude demeurera au même niveau durant toute la phase de R&D. Son effet est donc de compliquer l'apprentissage de la firme en introduisant un bruit constant provenant de l'environnement (cf. équation (12)). Nous considérons ci-dessous le cas où cette incertitude est faible et le cas où elle est forte.

- *Incertitude politique faible*

Lorsque l'incertitude attachée au montant de la taxe carbone est faible, nous obtenons les graphes ci-dessous pour les performances moyennes atteintes en fonction des valeurs des différents paramètres stratégiques et opérationnels.

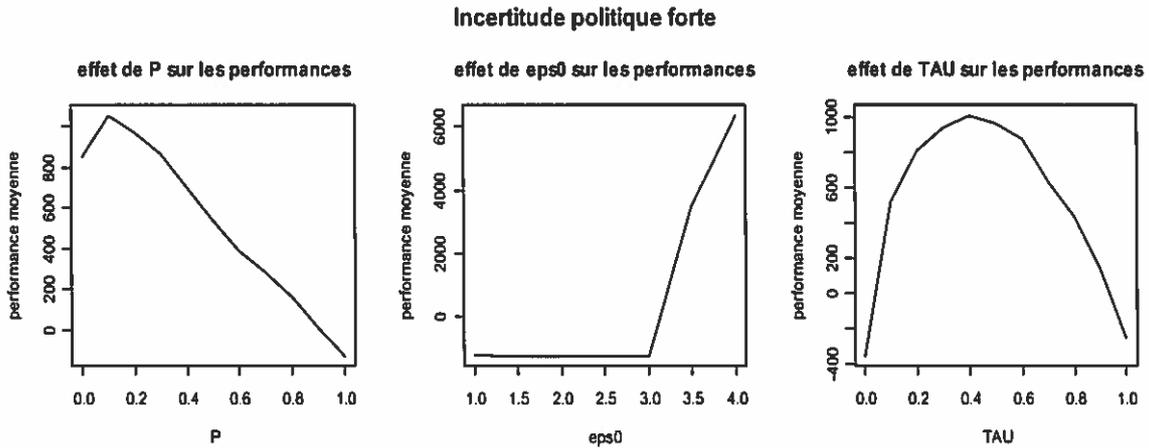


**Figure 8.** Performances moyennes en présence d'une politique environnementale constante associée à une incertitude faible

La figure ci-dessus est similaire à la Figure 6, présentant le cas sans politique avec incertitude technologique forte. Ceci s'explique par le fait que les deux incertitudes sont essentiellement additives. Ainsi, intégrer au problème que la firme a à résoudre l'incertitude environnementale a pour principal effet d'ajouter un bruit au signal que la firme cherche à évaluer. Ici, ce bruit reste faible et la firme peut résoudre le problème du choix de la meilleure technologie à mettre en œuvre dans la plupart des cas.

- *Incertitude politique forte*

Lorsque l'incertitude environnementale est plus forte, les cas solubles par la firme sont moins nombreux. En conséquence, la firme doit encore accentuer les caractéristiques observées dans le cas d'une incertitude technologique forte (en l'absence de politique environnementale) comme le montre les graphes ci-dessous.



**Figure 9.** Performances moyennes en présence d'une politique environnementale constante associée à une incertitude forte

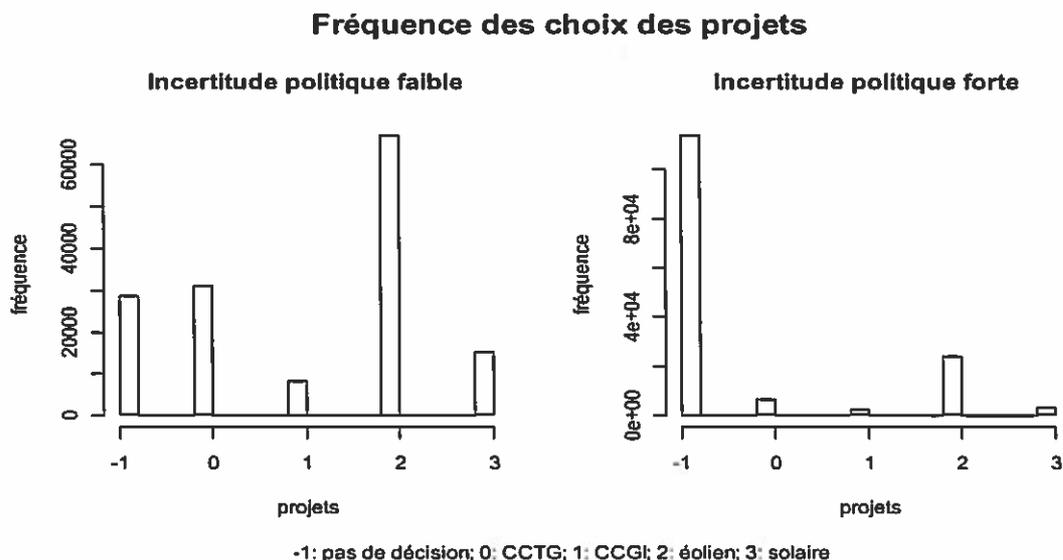
Dans ce cas, la meilleure attitude est de ne pas renouveler trop fréquemment son portefeuille de projet : la valeur optimale de  $P$  est encore plus faible que dans la Figure 8. Les performances atteignent des valeurs négatives aux grandes valeurs de  $P$  car la firme ne stabilise pas suffisamment son portefeuille pour pouvoir réduire l'incertitude en vue de prendre une décision (cf. (12)).

De la même manière, lorsqu'une incertitude environnementale forte vient s'ajouter à l'incertitude technologique, la firme doit avoir un moindre niveau d'exigence en termes de réduction de l'incertitude avant la prise de décision ( $\epsilon_0$  plus élevé que dans la Figure 8) afin de pouvoir mettre en œuvre certains projets. Le phénomène est plus marqué ici, car la firme est incapable de prendre une décision pour des valeurs de  $\epsilon_0 < 3$ .

Enfin, l'exploration du portefeuille doit également être moins intensive afin de concentrer les ressources de l'apprentissage sur un plus petit nombre de projets ( $\tau$  moins élevé que dans la Figure 8). C'est le seul moyen pour la firme de réduire suffisamment l'incertitude sur certains projets pour pouvoir prendre une décision.

- *Effet sur le choix des projets*

Afin d'illustrer d'avantage l'effet de l'introduction d'une incertitude environnementale, nous présentons ci-dessous les fréquences de sélection des différents projets dans les cas où l'incertitude environnementale est faible et forte.



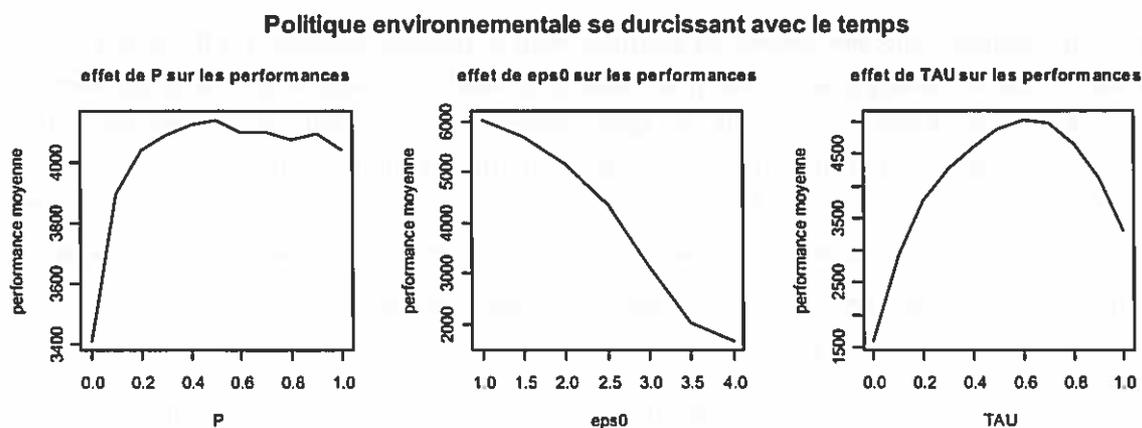
**Figure 10.** Effet d'une politique environnementale avec incertitude constante sur le choix des projets

La différence essentielle entre les deux situations est le nombre de non-décision. Dans le cas où l'incertitude est trop forte, la firme n'arrive pas à suffisamment réduire l'incertitude pour pouvoir prendre une décision en raison de la présence de l'incertitude environnementale constante (équation 12).

**(e) Comportement de l'organisation lorsque la politique environnementale est certaine mais se durcit progressivement**

Nous avons jusqu'à présent considéré des politiques environnementales constantes (avec une taxe carbone  $P_{CO_2}$  constante au cours du temps). Il est cependant plus réaliste de supposer que la taxe évolue au cours du temps, en fonction des décisions politiques et des contraintes sur les ressources naturelles. Nous considérons ici une taxe carbone qui croît avec le temps, mais sans incertitude dans un premier temps. La taxe carbone suit la dynamique décrite dans l'équation (3) avec  $\sigma_{CO_2}^t = 0$ , une moyenne à long terme du prix du  $CO_2$ ,  $\mu_{CO_2}$  de 50 €/tonne et un prix initial  $P_{CO_2}^0$  de 15 €/tonne de  $CO_2$ .

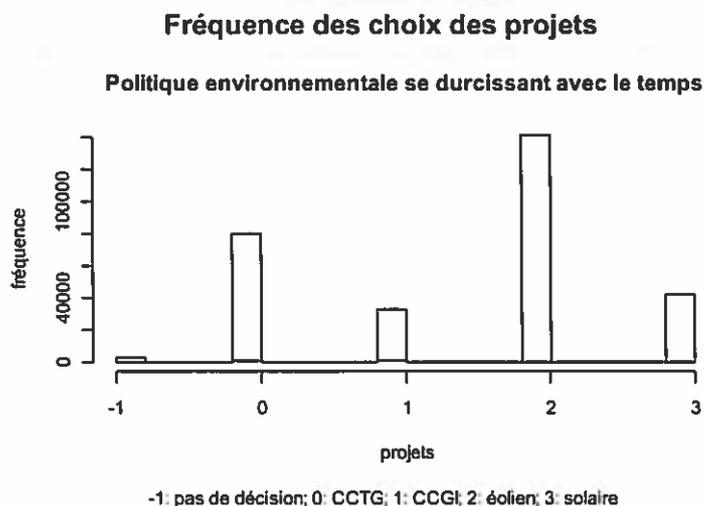
La Figure 11 ci-dessous présente les performances atteintes dans ces conditions.



**Figure 11.** Performances moyennes lorsque la politique environnementale est certaine, mais croît avec le temps

Les courbes ci-dessus ressemblent étroitement à celles de la Figure 5, c'est-à-dire le cas sans politique environnementale avec incertitude technologique faible.

Ainsi, en l'absence d'incertitude, une politique environnementale évolutive ne perturbe pas l'apprentissage des firmes qui évaluent correctement les projets. Comme le montre la figure ci-dessous, le meilleur projet (l'éolien) est très majoritairement choisi par la firme.



**Figure 12.** Fréquence des choix de projets lorsque la politique environnementale est certaine, mais croissante avec le temps

**(f) Comportement de l'organisation lorsque la politique environnementale est incertaine et que l'incertitude se réduit avec le temps**

Dans cette section, nous présentons les résultats pour le modèle complet. La firme fait face à une incertitude technologique, qu'elle peut réduire de manière endogène par l'apprentissage et à une incertitude technologique qui se réduit progressivement par le passage du temps (suivant les équations (3) et (4)). La politique environnementale se durcit avec le temps, partant d'un prix initial  $P_{CO_2}^0$  de 15€/tonne de CO<sub>2</sub> pour atteindre une moyenne à long terme  $\mu_{CO_2}$  de 50 €/tonne. La variable  $k_{CO_2}$  dans l'équation (4) contrôle la valeur de l'incertitude à  $t = 0$ . Dans ce qui suit, un  $k_{CO_2}$  élevé correspond à une incertitude initiale forte, un  $k_{CO_2}$  petit correspond à une incertitude faible.

Dans ce qui suit, nous présentons les meilleures configurations pour des incertitudes faible et élevée et regardons plus spécifiquement certaines configurations.

- *Incertitude politique initiale faible*

Meilleure configuration :

Dans le cas où l'incertitude est faible, nous obtenons les performances moyennes présentées dans la Figure 13.

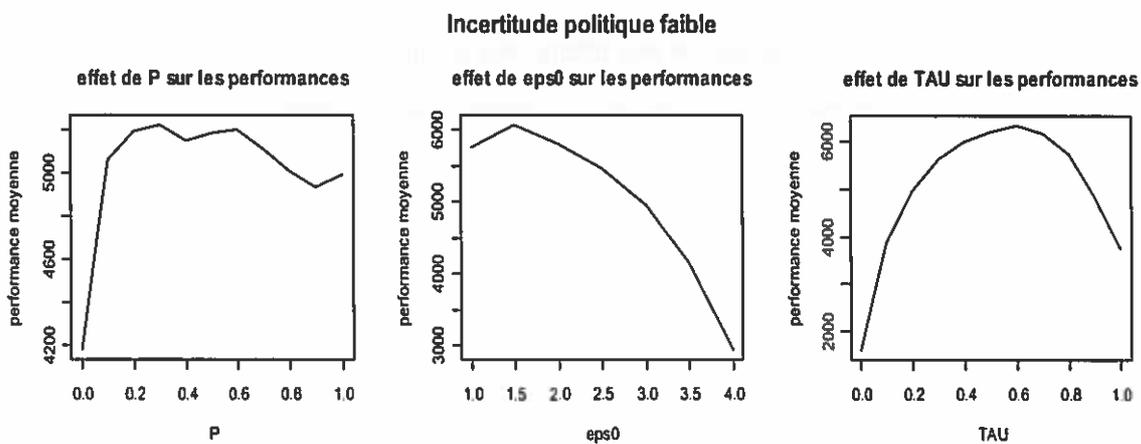


Figure 13. Performances moyennes lorsque l'incertitude politique est faible

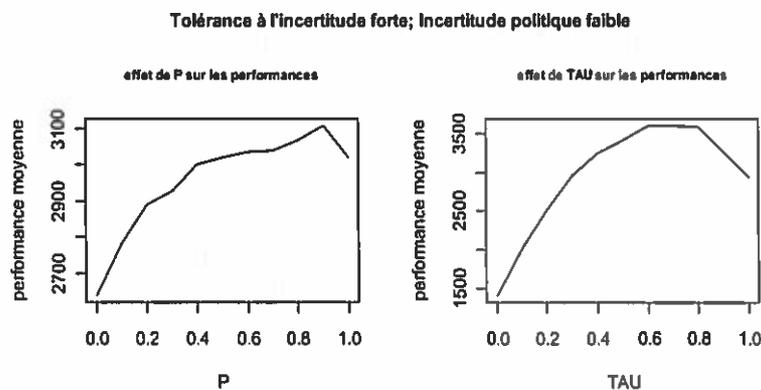
Comme dans le cas où nous ne considérons que l'incertitude technologique faible (cf. Figure 5), les meilleures performances sont atteintes pour un  $P$  élevé, un  $\epsilon_0$  faible et  $\tau$  relativement élevé (sans toutefois être maximum). Comme précédemment, lorsque l'incertitude est faible, la firme doit renouveler fréquemment son portefeuille de projets; attendre que l'incertitude attachée à la valeur des projets soit réduite au maximum; explorer assez intensivement son portefeuille de projets.

Cependant, l'ajout de l'incertitude politique force ici les entreprises à modifier leur organisation interne pour la prendre en compte. Lorsque l'incertitude politique vient s'ajouter à l'incertitude technologique, les courbes sont un peu modifiées par rapport au cas sans incertitude politique. Ainsi,  $\varepsilon_0$  doit être un peu plus élevé que dans le cas sans incertitude politique afin de permettre à la firme de prendre plus de décisions (cf. équation (12)). De même, contrairement à la Figure 5, les performances décroissent lorsque  $P$  devient trop grand car une trop grande instabilité dans la structure du portefeuille ne permet pas de conduire un apprentissage permettant de réduire une incertitude globale maintenant plus élevée. Le  $\tau$  optimum est également légèrement plus faible que dans le cas sans incertitude politique afin d'éviter une trop grande dilution des ressources sur un trop grand nombre de projets.

#### Configurations organisationnelles particulières :

Nous venons de voir quelle est la configuration organisationnelle permettant le mieux de faire face à une incertitude (technologique et politique) faible. A l'inverse, les plus mauvaises performances sont atteintes lorsque  $\varepsilon_0$  est grand (égal à 4, cas d'une très grande tolérance à l'incertitude) et/ou lorsque  $\tau$  est petit (égal à 0, cas de pur exploitation du portefeuille technologique). Nous pouvons cependant nous demander si, dans ces situations, il n'existerait pas des formes organisationnelles qui compenseraient pour partie ces attitudes.

Nous examinons dans un premier temps le cas où  $\varepsilon_0$  est grand (nous le fixons à 4). La Figure 14 présente les performances moyennes pour les deux autres paramètres dans ce cas.

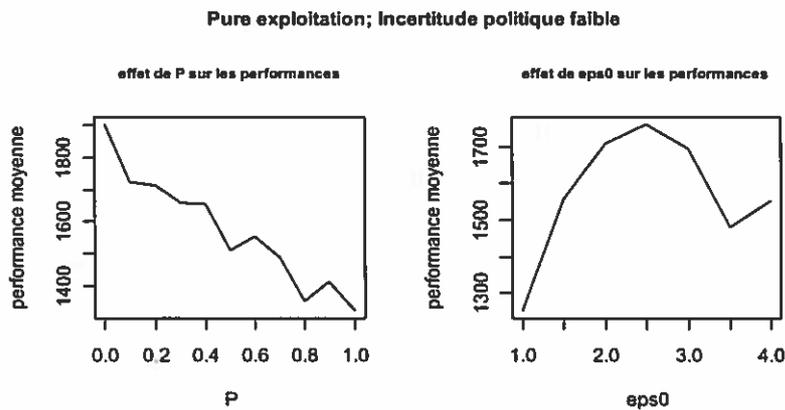


**Figure 14.** Performances moyennes lorsque la tolérance à l'incertitude est forte, en présence d'une incertitude politique faible

Dans ce cas, les meilleures performances moyennes sont atteintes pour de grandes valeurs de  $P$  et des valeurs de  $\tau$  plus élevées que précédemment (le  $\tau$  optimum passant de 0.6 à 0.8). Lorsque  $\varepsilon_0$  est très élevé, la firme tend à prendre des décisions rapidement, sans attendre que toute l'incertitude sur les valeurs des projets soit réduite. Le risque d'erreur est donc grand. Pour pallier à ce risque, la firme doit chercher à tester le plus de projets possibles. Tout se passe comme si la firme substituait une recherche horizontale (sur une multitude de projets) à une recherche verticale (réduire complètement l'incertitude sur un projet) rendue impossible par la demande du top management de prendre rapidement une décision, en situation de

grande incertitude. Afin de tester rapidement le plus grand nombre possible de projets, la firme doit à la fois explorer au maximum son portefeuille technologique ( $\tau$  élevé) et renouveler fréquemment celui-ci pour également explorer son environnement ( $P$  élevé).

La deuxième situation où les performances sont faibles est lorsque la firme ne décide d'apprendre que sur un projet de son portefeuille technologique ( $\tau = 0$ ). La figure ci-dessous (Figure 15) présente les performances moyennes atteintes en fonction des deux autres paramètres dans cette situation.



**Figure 15.** Performances moyennes lorsque la firme ne fait qu'exploiter, en présence d'une incertitude politique faible

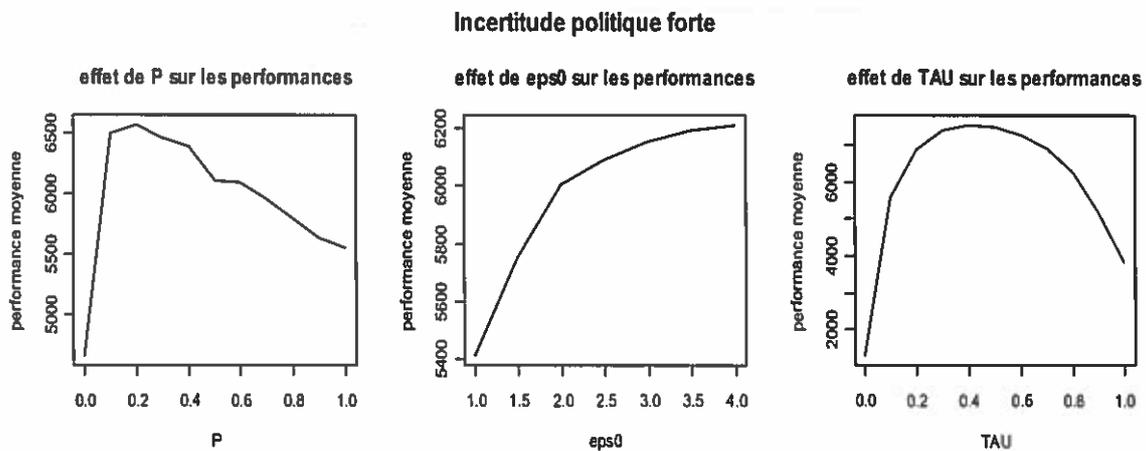
Dans cette situation, le meilleur choix de  $P$  est 0. En effet, dans la mesure où, au niveau opérationnel, la firme choisira de n'exploiter qu'un seul projet, renouveler le portefeuille n'apportera rien de nouveau car les nouveaux projets ne seront pas étudiés. En conséquence, renouveler le portefeuille n'apportera rien en termes d'apprentissage et consommera les ressources (les primes  $c_2$  qu'il faut payer pour renouveler le portefeuille. De même, la valeur optimale de  $\epsilon_0$  est significativement plus élevée que dans la Figure 13. Ceci est dû au fait que puisque la firme ne se focalise que sur un seul projet, il n'est pas nécessaire de chercher à réduire l'incertitude pour exercer un choix parmi plusieurs projet. Le  $\epsilon_0$  optimum n'est toutefois pas le maximum car la firme doit encore choisir si elle va exercer ou non le projet, donc si sa valeur estimée est bien supérieure au seuil d'exercice (cf. (13)).

- *Incertitude politique initiale forte*

Meilleure configuration :

Nous nous intéressons maintenant au cas où l'environnement est caractérisé par une incertitude forte. Dans ce cas, la meilleure configuration est apparente dans les courbes de la Figure 16.

Par rapport au cas où l'incertitude est faible, les meilleures performances sont ici atteintes pour  $P$  faible,  $\varepsilon_0$  élevé et  $\tau$  relativement faible (0.4 ici, contre 0.6 dans le cas de l'incertitude faible). Comme dans le cas où nous ne considérons que l'incertitude technologique, lorsque l'incertitude est forte, la firme doit avant tout chercher à prendre une décision pour atteindre des performances importantes.



**Figure 16.** Performances moyennes lorsque la tolérance à l'incertitude est forte, en présence d'une incertitude politique forte

En conséquence, les meilleures performances sont atteintes pour un  $\varepsilon_0$  élevé qui est plus accessible pour la firme dans un environnement hautement incertain. Par ailleurs, il est également nécessaire pour la firme de concentrer ses ressources afin de réduire l'incertitude. Cela implique de ne pas trop explorer, ni au niveau stratégique ( $P$  peu élevé), ni au niveau opérationnel ( $\tau$  peu élevé). Il est cependant nécessaire d'explorer un minimum à ces deux niveaux afin de réduire les risques d'erreurs ( $\tau$  et  $P$  doivent être supérieurs à 0).

Un autre effet intéressant est que, si nous comparons les performances moyennes atteintes lorsque l'incertitude est faible et lorsqu'elle est forte, elles sont plus élevées dans ce deuxième cas. En d'autres termes, une incertitude politique qui se réduit avec le temps a un effet positif sur l'apprentissage. Notons que ce n'est pas le cas lorsque l'incertitude ne se réduit pas avec le temps (point 4 de cette partie).

Cet effet positif de l'incertitude politique s'explique par le fait qu'une incertitude politique initiale forte retarde d'autant le moment de la décision, comme le montre la Figure 17 ci-dessous. L'incertitude politique, en empêchant la firme de réduire rapidement l'incertitude

sous le seuil  $\varepsilon_0$  à partir duquel elle s'autorise à prendre une décision (équation (12)), la force à continuer son apprentissage et donc à réduire les erreurs commises. En même temps, puisque l'incertitude politique se résout de toute façon par le passage du temps, la firme prendra quand même une décision avant la fin de la phase de R&D.

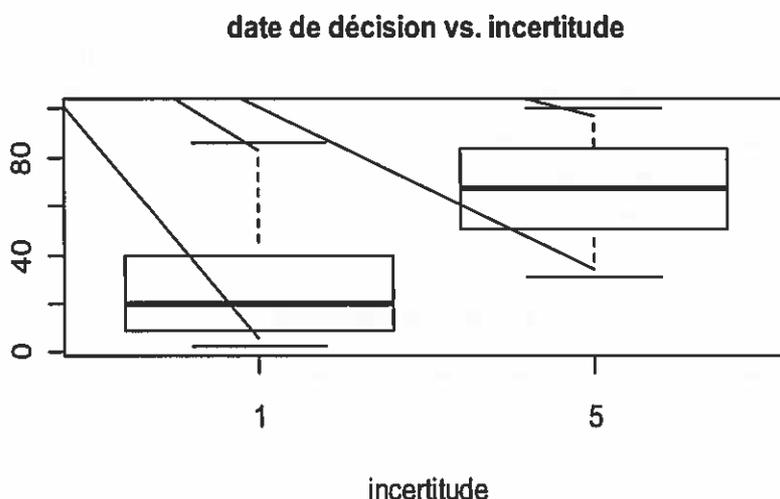
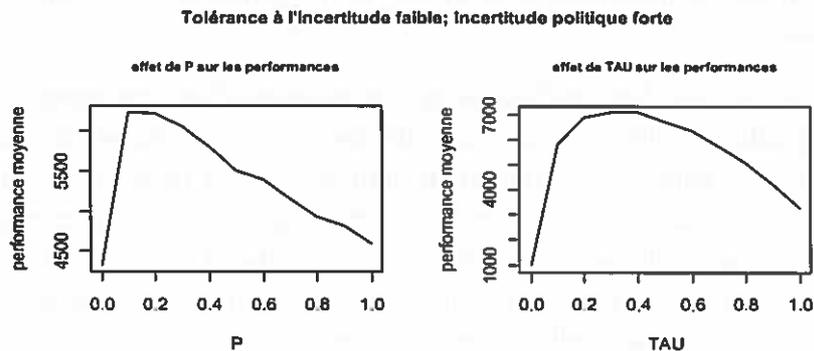


Figure 17. Quartiles des dates de décision pour les incertitudes faible et forte

Configurations organisationnelles particulières :

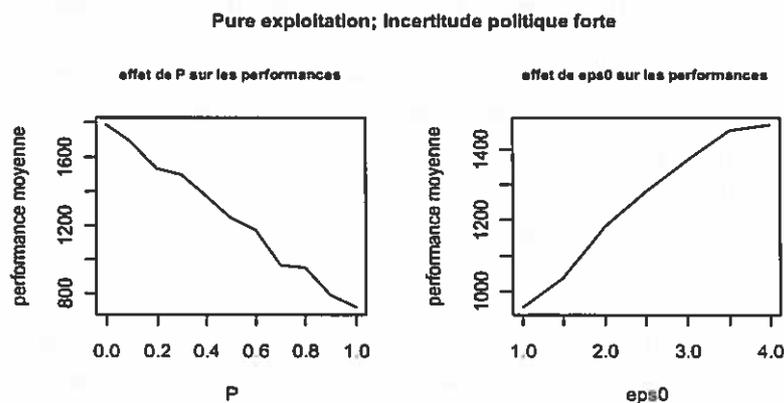
Comme précédemment, nous nous intéressons aux situations dans lesquelles la firme atteint ses plus mauvaises performances, c'est-à-dire quand  $\varepsilon_0$  est petit (égal à 1) et/ou quand  $\tau$  est égal à 0.

Lorsque  $\varepsilon_0$  est égal à 1, cela signifie que la firme exige d'avoir considérablement réduit l'incertitude avant de prendre une décision. Cela est particulièrement difficile à réaliser lorsque l'incertitude de l'environnement est élevée. Dans ce cas, comme dans le cas général, la firme doit chercher à concentrer ses ressources sur peu de projets afin de réduire l'incertitude en vue de prendre une décision. En conséquence, la firme doit peu renouveler son portefeuille ( $P$  faible) et peu explorer son portefeuille existant ( $\tau$  faible). Ces résultats sont illustrés Figure 18 ci-dessous.



**Figure 18.** Performances moyennes lorsque la tolérance à l'incertitude est faible, en présence d'une incertitude politique forte

Lorsque  $\tau$  est égal à 0, la firme se focalise sur un unique projet. Dans ce cas là, la performance dépend essentiellement de l'économie réalisée sur les coûts de R&D. En conséquence, les performances sont les meilleures lorsque  $\varepsilon_0$  est grand, ce qui garantit une prise de décision rapide et lorsque  $P$  est nul, c'est-à-dire quand le portefeuille est tout à fait stable (Figure 19).



**Figure 19.** Performances moyennes lorsque la firme ne fait qu'exploiter son portefeuille, en présence d'une incertitude politique forte

### - Synthèse

Dans notre prise en compte de l'impact des politiques environnementales sur les choix technologiques des firmes, nous avons pris pour hypothèse que les décisions politiques étaient un phénomène exogène aux firmes. Cela signifie que les firmes n'ont pas de prise sur les décisions politiques, que ce soit sur le niveau de la taxe carbone ou sur la réduction de l'incertitude qui y est attachée. Par ailleurs, compte tenu de l'équation (6), les incertitudes politiques et technologiques sont essentiellement additives, l'effet des incertitudes politiques étant alors essentiellement d'ajouter du bruit dans l'environnement et de compliquer la prise de décision des firmes. L'introduction de la politique environnementale dans le modèle permet de

faire un certain nombre d'observations au niveau de l'organisation des firmes et pour les décideurs politiques.

Nos résultats montrent que les configurations organisationnelles permettant la meilleure gestion du portefeuille d'options varient en fonction de l'environnement. Ainsi, quand l'incertitude globale est faible, la configuration optimale tend à favoriser la limitation des erreurs d'évaluation. Dans la mesure où la firme a suffisamment de ressources pour faire face à ce type d'environnement, elle peut prendre le temps de chercher la meilleure solution en résolvant complètement l'incertitude sur l'ensemble des technologies disponibles. Quand l'incertitude globale est forte, la meilleure configuration est celle qui permet de prendre une décision. Dans ce cas, elle cherche cependant également à limiter les erreurs en maintenant un certain niveau d'exploration de son environnement, bien qu'à un degré moindre que dans le cas où l'incertitude est faible.

D'autre part, l'étude de certaines configurations particulières montre que la firme cherche à compenser les carences à certains niveaux en accentuant les caractéristiques d'autres niveaux. Ainsi par exemple, lorsque les dirigeants souhaitent prendre une décision rapidement, la firme compense les risques induits par ce comportement stratégique en menant une activité exploratoire intense afin d'élargir la gamme de choix potentiels. Ainsi, les paramètres se compensent les uns les autres et il existe un jeu entre les niveaux stratégiques et opérationnels.

Enfin, notons que les configurations optimales diffèrent en absence et présence de politique environnementale lorsqu'il y a une incertitude politique. Les valeurs optimales des différents paramètres sont modifiées par l'introduction d'une politique environnementale. En d'autres termes, la mise en place d'une politique environnementale doit induire des changements organisationnels dans les firmes afin que celles-ci puissent répondre de manière efficace à ce nouvel environnement.

La politique environnementale a pour premier effet de modifier les valeurs nettes des projets et influe donc sur le choix des firmes. La fixation d'un prix carbone, que celui-ci soit constant au cours du temps ou qu'il augmente progressivement, modifie les valeurs des projets pour donner un avantage aux solutions non carbonées. Ceci est vrai quelque soit l'incertitude associée à la politique environnementale. Il convient de noter qu'ici la politique environnementale ne révèle pas un optimum que les firmes n'aurait pas su voir avant sa mise en œuvre. Plutôt, la politique environnementale, par la réduction des *cash flows* générés par les technologies carbonées déplace l'optimum par le changement des valeurs nettes des différentes technologies.

L'incertitude attachée à la politique écologique ajoute de la complexité à l'environnement auquel est confrontée la firme et rend ses décisions plus difficiles à prendre. Nous pouvons cependant distinguer deux cas. Si l'incertitude n'est jamais réduite, elle est alors assimilable à un bruit constant qui perturbe les décisions des firmes qui ont du mal à déterminer quelle technologie sera la plus profitable. Ceci découle directement de notre hypothèse selon laquelle les firmes n'ont aucune prise sur les choix politiques. Elles ne font que subir les incertitudes des décisions politiques, ce qui conduit à de moins bonnes performances économiques.

La situation est cependant différente lorsque l'incertitude politique se réduit avec le temps. Dans ce cas, l'incertitude initiale force les entreprises à maintenir une activité de R&D diversifiée soutenue, ce qui leur permet d'acquérir une compréhension fine des différentes technologies et de faire un choix avec un risque d'erreur limité lorsque l'incertitude politique se réduit suffisamment. Ainsi, une incertitude politique, à la condition qu'elle se réduise progressivement dans le temps, peut être bénéfique.

Le modèle met donc en évidence deux leviers pour les décideurs politiques. Ils peuvent d'une part jouer sur le niveau de la taxe carbone pour orienter le choix des firmes vers les technologies les moins polluantes. D'autre part, en jouant sur le rythme de réduction de l'incertitude attachée à ces politiques, ils peuvent influencer sur la conduite de la R&D au sein des firmes et amener ces dernières à limiter leurs erreurs dans leur choix technologique.

## Conclusion de la Partie II

L'originalité de cette recherche est de se concentrer sur les mécanismes internes et l'organisation des firmes et sur la manière dont ils influent sur les décisions d'investissement dans des technologies de production d'électricité. Nous nous sommes attachés plus particulièrement à l'étude des mécanismes décisionnels, en considérant un raisonnement à base d'options réelles. Les décisions sont elles-mêmes guidées par les structures organisationnelles et les capacités cognitives des firmes, en particulier leur aptitude à trouver l'équilibre entre exploration et exploitation des connaissances. Nous avons de plus adopté l'hypothèse de rationalité limitée, en ce que les firmes disposent d'une information imparfaite sur l'environnement et que leur mécanismes d'apprentissage et de décision sont sujets à erreur.

Nous avons étudié la manière dont les firmes prennent des décisions d'investissement lorsqu'elles sont confrontées à des environnements composés d'une dimension technologique et politique, chacune de ces dimensions étant caractérisée par une incertitude spécifique.

Le rapport met en évidence les interactions entre différents traits stratégiques et opérationnels et la manière dont ces différentes caractéristiques s'alignent pour atteindre les meilleures performances en fonction de la complexité de l'environnement. Ces interactions peuvent prendre la forme d'un renforcement mutuel, lorsque les comportements aux différents niveaux organisationnels tendent tous dans la même direction, ou d'une compensation, lorsque les risques induits par un comportement spécifique à un niveau appelle un comportement correctif à un autre niveau. Les équilibres spécifiques que trouvera chaque firme dépendront de son environnement et des contraintes qu'il impose en termes de difficulté de décision.

A chaque environnement correspond une organisation optimale particulière. De ce fait, l'introduction ou la modification d'une politique environnementale force les entreprises à modifier leur organisation interne pour s'adapter à ces changements environnementaux. Ce fait suggère qu'il est possible que toutes les firmes ne s'adaptent pas à la politique environnementale, où en tout cas devront accepter un coût lié à la modification des routines et processus de R&D et de décision.

D'une manière générale, l'introduction d'une taxe carbone constitue une difficulté supplémentaire pour les firmes qui ont à prendre des décisions d'investissement. Cela accroît la complexité de l'environnement et rend plus difficile la construction d'une représentation juste de l'environnement par les firmes.

Néanmoins, une politique environnementale peut influencer sur les décisions des firmes et conduire à un état socialement désirable. A cet effet, les décideurs politiques peuvent jouer sur deux leviers pour orienter le choix des firmes vers des technologies moins polluantes. Le premier est le montant de la taxe carbone. En affectant les *cash flows* et en rendant les technologies moins polluantes plus attractives pour les producteurs d'énergie, un montant élevé de la taxe carbone poussera les firmes vers les technologies utilisant un combustible non carbonée. Il existe en outre un deuxième levier, complémentaire au premier, qui est

**l'incertitude attachée à la politique environnementale. En jouant sur le rythme de réduction de l'incertitude entourant les choix politiques, les décideurs politiques peuvent imprimer un rythme à la R&D des firmes et amener ces dernières à conduire des apprentissages plus poussés sur chacune des technologies disponibles et éclairer ainsi d'avantage leurs décisions.**

## Appendice 1. Valeurs numériques des variables du modèle

### Variables dont les valeurs sont issues de la littérature

Technologie	Coût d'investissement initial (k\$/MW) ( $F_i$ )	Efficacité (%) ( $\eta_i$ )	Facteur de charge (%) ( $\pi_i$ )	Facteur d'émission du combustible ( $e_i$ )	Taux d'apprentissage par R&D permettant de réduire les coûts ( $\lambda_i$ )	Durée de l'installation en année ( $T_i$ )
A. CCTG	972	57	85	56	1	25
B. CCGI	1260	46	85	95	5	25
C. Eolienne offshore	2500	-	40	-	10	25
D. Solaire photovoltaïque	6000	-	15	-	20	25

Sources: Yang *et al.* (2008), IEA (2006)

### Variables utilisées pour calibrer le modèle

Catégorie	Nom de la variable	Valeur	Signification
Technologie	C	1	Capacité installée
	h	10 000 heures	Nombre d'heures annuel de fonctionnement
	$p_i$	28/60/0/0 €/tonne	Prix du combustible
	$\sigma_i^F$	Faible: 1 Fort: 6	Incertitude technologique
Politique	$P_{CO_2}^0$	15 €/tonne	Prix initial du CO <sub>2</sub>
	$\mu_{CO_2}$	50 €/tonne	Moyenne à long terme du prix du CO <sub>2</sub>
	$k_{CO_2}$	Faible: 1 Fort: 5	Contrôle la valeur de l'incertitude à $t = 0$
	$\nu_{CO_2}$	∈ [0,1]	Contrôle la forme de la réduction de l'incertitude
	$\sigma_{CO_2}$	Faible: 1 Fort: 5	Incertitude politique
Autres variables de l'environnement	$P_E$	120 €/MWh	Prix de l'électricité
	$c_1$	5 k€	Prime à payer pour apprendre sur un projet du portefeuille
	$c_2$	15 k€	Prime à payer pour renouveler un projet du portefeuille
	$m$	4 projets	Nombre de projets dans l'environnement
	$T$	100 périodes	date de fin de la phase de R&D
Organisation	$n$	∈ [2,3] projets	Taille du portefeuille technologique de la firme
	$\gamma$	0.9	Seuil sous lequel un projet peut être supprimé du portefeuille
	$P$	∈ [0,1]	Probabilité de renouveler un projet du portefeuille
	$\tau$	∈ [0,1]	Probabilité d'explorer le portefeuille
	$\varepsilon_0$	∈ [1,4]	Seuil d'incertitude sous lequel une firme est prête à investir
	$Q_{Th}$	0 k€	Seuil d'exercice

## Références

- Adner R. et D.A. Levinthal (2004a)** "What is Not a Real Option: Considering Boundaries for the Application of Real Options to Business Strategy", *Academy of Management Review*, Vol. 29, N° 1, pp. 74-85.
- Adner R. et D.A. Levinthal (2004b)** "Reply: Real Options and real trade-offs", *Academy of Management Review*, Vol. 29, N° 1, pp. 120-126.
- Ambec, S., and P. Barla (2002)** "A Theoretical Foundation of the Porter Hypothesis", *Economics Letters* 75(3), 355-360.
- Ambec, S., and P. Barla (2006)** "Can Environmental Regulations Be Good for Business? An Assessment of the Porter Hypothesis", *Energy Studies Review*, Vol. 14, N° 2, pp. 42-62.
- Arjaliès D.-L. et J.-P. Ponssard (2010)** "A Managerial Perspective on the Porter Hypothesis: The Case of CO<sub>2</sub> Emissions", in Crifo P. and J.-P. Ponssard (eds.), *Corporate Social Responsibility: From Compliance to Opportunity?* Les Editions de l'Ecole Polytechnique, pp. 151-168.
- Amram, M. et N. Kulatilaka (1999)** *Real Options: Managing Strategic Investment in an Uncertain World*, Financial Management Association Survey and Synthesis Series, Boston, MA: Harvard Business School Press.
- Baker E. et E. Shittu (2006)** "Profit-maximizing R&D in response to a random carbon tax", *Resource and Energy Economics*, Vol. 28, pp. 160-180
- Baker E., L. Clarke et J. Weyant (2006)** "Optimal Technology R&D in the Face of Climate uncertainty", *Climatic Change*, Vol. 78, pp. 157-179.
- Baker, E., L. Clarke et E. Shittu (2008)** "Technical change and the marginal cost of abatement", *Energy Economics*, Vol. 30, pp. 2799-2816
- Baker E. et E. Shittu (2008)** "Uncertainty and endogenous technical change in climate policy models", *Energy Economics*, Vol. 30, pp. 2817-2828.
- Baker E. et K. Adu-Bonnah (2008)** " Investment in risky R&D programs in the face of climate uncertainty", *Energy Economics*, Vol. 30, pp. 465-486.
- Baker E. (2009)** "Optimal Policy under Uncertainty and Learning about Climate Change: A Stochastic Dominance Approach", *Journal of Public Economic Theory*, Vol. 11, N° 5, pp. 721-747.
- Bansal S. et S. Gangopadhyay (2005)** "Incentives for Technological Development: BAT Is Bad", *Environmental and Resource Economics*, Vol. 30, pp. 345-367.
- Biglaiser, G. et J.K. Horowitz (1995)** "Pollution regulation and incentives for pollution control research", *Journal of Economics and Management Strategy*, Vol. 3 pp. 663-684.

**Barnett M. L.** (2005) "Paying attention to real options", *R&D Management*, Vol. 35, N° 1, pp. 61-72.

**Barnett, M.L.** (2008) "An Attention-Based View of Real Options Reasoning", *Academy of Management Review*, Vol. 33, N° 3, pp. 606–628.

**Baudry M.** (2000) "Joint Management of Emission Abatement and Technological Innovation for Stock Externalities", *Environmental and Resource Economics*, Vol. 16, pp. 161–183.

**Benner, M. J. et M. L., Tushman** (2002) "Process management and technological innovation: A longitudinal study of the photography and paint industries", *Administrative Science Quarterly*, Vol. 47, pp. 676–706.

**Bernardo, A. E. et B. Chowdhry** (2002) "Resources, real options, and corporate strategy", *Journal of Financial Economics*, Vol. 63, pp. 211–234.

**Blanford G.J. et L.E. Clarke** (2003) "On the Optimal Allocation of R&D Resources for Climate Change Technology Development", *UCRL-TR-200982*.

**Blanford G. J.** (2009) "R&D investment strategy for climate change", *Energy Economics*, Vol. 31, pp. S27–S36.

**Bosetti, V. M. Tavoni** (2009) "Uncertain R&D, backstop technology and GHGs stabilization", *Energy Economics*, Vol. 31, pp. S18–S26.

**Bosetti V. et L. Drouet** (2005) "Accounting for Uncertainty Affecting Technical Change in an Economic-Climate Model", Technical Report, *FEEM Working Paper 147*, Fondazione Eni Enrico Mattei, Milan.

**Bowman E.H. et D. Hurry** (1993) "Strategy Through the Option Lens: An Integrated View of Resource Investments and the Incremental Choice Process", *Academy of Management Review*, Vol. 18, N° 4, pp. 760-782.

**Böhringer C. et T.F. Rutherford** (2007) "Innovation, Uncertainty and Instrument Choice for Climate Policy", *Working Paper*, <http://www.socialpolitik.de/tagungshps/2007/paper/Boehringer.pdf>

**Böhringer C., T.P. Mennel et T. F. Rutherford** (2009) "Technological change and uncertainty in environmental economics", *Energy Economics*, Vol. 31, pp. S1–S3.

**Burgelman, R. A.** (1991) "Intra-organizational ecology of strategy-making and organizational adaptation", *Organization Science*, Vol. 2, pp. 239–262.

**Burgelman, R. A.** (2002) "Strategy as vector and the inertia of co-evolutionary lock-in", *Administrative Science Quarterly*, Vol. 47, pp. 325–357.

**Burger-Helmchen T.** (2009) "Option chain and change management: A structural equation application", *European Management Journal*, Vol. 27, pp. 176– 186.

Cadot, O. et B. Sinclair-Desgagné (1995a ) "Environmental Standards and Industrial Policy," *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 29, N° 2, pp. 228-237.

Cadot, O. et B. Sinclair-Desgagné (1995b) "Innovation under the Threat of Stricter Environmental Standards," in C. Carraro, Y. Katsoulacos and A. Xapapadeas (eds.), *Environmental Policy and Market Structure*, Kluwer, 131-141.

Childs, P. D., S.H. Ott et A.J. Triantis (1998) "Capital Budgeting for Interrelated Projects: A Real Options Approach", *Journal of Financial and Quantitative Analysis*, Vol. 33, N° 3, pp. 305-334.

Childs, P. D. et A.J. Triantis (1999) "Dynamic R&D Investment Policies", *Management Science*, Vol. 45, No. 10, pp. 1359–1377.

Chowdhury P. R. (2010) "The Porter Hypothesis and Hyperbolic Discounting" *EERI Research Paper Series* No 42/2010, Economics and Econometrics Research Institute. Available at [www.eeri.eu/documents/wp/EERI\\_RP\\_2010\\_42.pdf](http://www.eeri.eu/documents/wp/EERI_RP_2010_42.pdf).

Coff R. W. et K. J. Laverly (2001) "Real Options on Knowledge Assets: Panacea or Pandora's Box?", *Business Horizons*, Vol., 44, N° 6, pp. 73-79.

Dixit, A.K. et R.S. Pindyck (1994) *Investment under Uncertainty*, Princeton, NJ: Princeton University Press.

Farzin Y.H. et P.M. Kort (2000) "Pollution Abatement Investment when Environmental Regulation is Uncertain", *Journal of Public Economic Theory*, Vol. 2, N° 2, pp. 183–212.

Feichtinger, G., R.F. Hartl, P.M. Kort et V.M. Veliiov (2005) "Environmental policy, the porter hypothesis and the composition of capital: Effects of learning and technological progress", *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 50, pp. 434-446.

Fischer C. et R. G. Newell (2008) "Environmental and technology policies for climate mitigation", *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 55, pp. 142–162.

Fischer, C., I.W.H. Parry et W. A. Pizer (2003) "Instrument choice for environmental protection when technological innovation is endogenous", *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 45 pp. 523–545

Gabel, L. et B. Sinclair-Desgagné (1993) "Managerial Incentives and Environmental Compliance", *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 24, N° 3, pp. 229–240.

Gabel, L. et B. Sinclair-Desgagné (1999) "The Firm, its Routines, and the Environment", in T. H. Tietenberg and H. Folmer, eds., *The International Yearbook of Environmental and Resource Economics 1998/99: A Survey of Current Issues*, Cheltenham: Edward Elgar, 89-118.

**Gabel, L. et B. Sinclair-Desgagné** (2001) "The Firm, its Procedures, and Win-Win Environmental Regulations", in H. Folmer, L.H. Gabel, S. Gerkin and A. Rose (eds.), *Frontiers of Environmental Economics*, Cheltenham: Edward Elgar, 148-175.

**Garud R., A. Kumaraswamy et P. Nayyar** (1998) "Real Options or Fool's Gold? Perspective Makes the Difference", *Academy of Management Review*, Vol. 23, No. 2, 212-214.

**Garud, R. et A. H. Van De Ven** (1992) "An Empirical Evaluation of the Internal Corporate Venturing Process", *Strategic Management Journal*, Vol. 13, Special Issue (Strategy Process: Managing Corporate Self-Renewal), pp. 93-109.

**Gavetti G. et D. Levinthal** (2000) "Looking Forward and Looking Backward: Cognitive and Experiential Search", *Administrative Science Quarterly*, Vol. 45, pp. 113-137.

**Gibson C. B. et J. Birkinshaw** (2004) "The antecedents, consequences, and mediating role of organizational ambidexterity", *Academy of Management Journal*, Vol. 47, pp. 209-229.

**Goel R.K.E. et W.T. Hsieh** (2006) "On coordinating environmental policy and technology policy", *Journal of Policy Modeling*, Vol. 28, pp. 897-908.

**Goeschl T. et G. Perino** (2007) "On Backstops and Boomerangs: Environmental R&D under Technological Uncertainty", *Discussion Paper Series* No. 437, Alfred-Weber-Institute, Department of Economics, University of Heidelberg.

**Greaker, M.** (2006) "Spillovers in the development of new pollution abatement technology: A new look at the Porter-hypothesis", *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 52, pp. 1411-420.

**Gupta A. K., K. G. Smith et C. E. Shalley** (2006) "The Interplay Between Exploration and Exploitation", *Academy of Management Journal*, Vol. 49, No. 4, pp. 693-706.

**Hart, R.** (2004) "Growth, Environment and Innovation: A Model with Production Vintages and Environmentally Oriented Research", *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 48, N° 3, pp. 1078-98.

**He, Z.-L. et P.-K. Wong** (2004) "Exploration vs. exploitation: An empirical test of the ambidexterity hypothesis". *Organization Science*, Vol. 15 pp. 481-494.

**Helm C. et A. Schöttner** (2008) "Subsidizing Technological Innovations in the Presence of R&D Spillovers", *German Economic Review*, Vol. 9, N° 3, pp. 339-353.

**Hoel, M. et L. Karp** (2001) "Taxes and quotas for a stock pollutant with multiplicative uncertainty", *Journal of Public Economics*, Vol. 82, pp. 91-114.

**Katila, R. et G. Ahuja** (2002) "Something old, something new: A longitudinal study of search behavior and new product introduction", *Academy of Management Journal*, Vol. 45, pp. 1183-1194.

- Keohane, N. O.** (2003) "Prices, Quantities, and Two-Part Tariffs: Optimal Environmental Policy with Endogenous Technical Change", *Discussion paper, Yale School of Management*; 2003.
- Kim, D.J. et B. Kogut** (1994) "Technological Platforms and Diversification", *Organization Science*, Vol. 7, N° 3, pp. 283-301.
- Kirzner, I.** (1979) *Perception, opportunity and profit*, University Press of Chicago, Chicago.
- Kogut, B.** (1991) "Joint Ventures and the Option to Expand and Acquire", *Management Science*, Vol. 37, N° 1, pp. 19-33.
- Kogut, B. et N. Kulatilaka** (1994) "Options Thinking and Platform Investments: Investing in Opportunity", *California Management Review*, Vol. 36, Winter, pp. 52-71.
- Kogut, B. et N. Kulatilaka** (2001) "Capabilities as Real Options", *Organization Science*, Vol. 12, N° 6, pp.744-758.
- Koussis N., H. S. Martzoukos et L. Trigeorgis** (2007) "Real R&D options with time-to-learn and learning-by-doing", *Annals of Operations Research*, Vol. 151, pp. 29–55.
- Krysiak F. C.** (2011) « Environmental regulation, technological diversity, and the dynamics of technological change », *Journal of Economic Dynamics and Control*, 35, pp. 528-544.
- Krysiak, F. C.** (2008) "Prices vs. quantities: The effects on technology choice", *Journal of Public Economics*, Vol. 92, pp. 1275–1287.
- Jansen, J.P., F.A.J. van den Bosch, H.W. Volberda** (2006) "Exploratory innovation, exploitative innovation, and performance: Effects of organizational antecedents and environmental moderators", *Management Science*, Vol. 52, pp. 1661–1674.
- Laffont, J.-J. et J. Tirole** (1996) "Pollution permits and environmental innovation", *Journal of Public Economics*, Vol. 62, pp. 127-141.
- Leonard-Barton, D. A.** (1992) "Core Capabilities and Core Rigidities: A Paradox in Managing New Product Development", *Strategic Management Journal*, Vol. 13, pp. 111-125.
- Levinthal, D. A., et J. G. March** (1993) "The myopia of learning", *Strategic Management Journal*, Vol. 14 (special issue), pp. 95–112.
- Löschel A. et V.M. Otto** (2009) "Technological uncertainty and cost effectiveness of CO2 emission reduction", *Energy Economics*, Vol. 31, pp. S4–S17
- MacMillan I.C. et R. G. McGrath** (2002) "Crafting R&D Project Portfolios", *Research Technology Management*, Vol. 45, N° 5, pp. 48-60.
- Magat, W.A.** (1979). "The effects of environmental regulation on innovation", *Law and Contemporary Problems*, Vol. 43, pp. 3-25.

- March, J. G.** (1991) "Exploration and exploitation in organizational learning", *Organization Science*, Vol. 2, pp. 71–87.
- March, J. G.** (1996) "Continuity and change in theories of organizational action", *Administrative Science Quarterly*, Vol. 41, pp. 278–287.
- March, J. G.** (2006) "Rationality, foolishness, and adaptive intelligence", *Strategic Management Journal*, Vol. 27, pp. 201–214.
- McGrath, R.G.** (1997) "A Real Options Logic for initiating technology Positioning Investments" *Academy of Management Review*, Vol. 22, N° 4, pp. 974-996.
- McGrath, R. G.** (1999) "Falling Forward: Real Options Reasoning and Entrepreneurial Failure", *Academy of Management Review*, Vol. 24, No. 1, pp. 13-30.
- McGrath, R. G.** (2001) "Exploratory learning, innovative capacity, and managerial oversight", *Academy of Management Journal*, Vol. 44, pp. 118–131.
- McGrath R.G. et A. Nerkar** (2004) "Real Options Reasoning and a New Look at the R&D Investment Strategies of Pharmaceutical Firms", *Strategic Management Journal*, Vol. 25, pp. 1–21.
- McGrath, R.G., W.J. Ferrier et A.L. Mendelow** (2004) "Real Options as Engines of Choice and Heterogeneity", *Academy of Management Review*, Vol. 29, N°. 1, pp. 86-101.
- Mendelsohn, R.** (1984) "Endogenous technical change and environmental regulation", *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 11, pp. 202–207.
- Miller K.D. et A.T. Arikan** (2004) "Technology Search Investments : Evolutionary, Option Reasoning and Option Pricing Approaches", *Strategic Management Journal*, Vol. 25, N°. pp. 473-485.
- Mohr R. D.** (2002) "Technical Change, External Economies, and the Porter Hypothesis", *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 43, pp. 158-168.
- Mohr, R.D. et S. Saha** (2008) "Distribution of Environmental Costs and Benefits, Additional Distortions and the Porter Hypothesis", *Land Economics*, Vol. 84, N° 4, pp. 689–700.
- Nerkar A.** (2003) "Old Is Gold? The Value of Temporal Exploration in the Creation of New Knowledge", *Management Science*, Vol. 49, No. 2, pp. 211–229.
- Newell R., et W. Pizer** (2003) "Regulating stock externalities under uncertainty", *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 45, pp. 416-432.
- Newton D. P., D. A. Paxson et M. Widdicks** (2004) "Real R&D options", *International Journal of Management Reviews*, Vol. 5-6, N°. 2, pp. 113–130.
- Parry, I.W.H.** (1995) "Optimal pollution taxes and endogenous technological progress", *Resource and Energy Economics*, Vol. 17 pp. 69-85.

**Parry, I.W.H.** (1998) "Pollution Regulation and the Efficiency Gains from Technological Innovation", *Journal of Regulatory Economics*; Vol. 14, pp. 229-254.

**Pizer, W.** (1999) "The optimal choice of climate change policy in the presence of uncertainty", *Resource and Energy Economics*, Vol. 2, N° 3-4, p. 255-287

**Pizer, W.** (2002) "Combining price and quantity controls to mitigate global climate change". *Journal of Public Economics*, Vol. 85, pp. 409-434.

**Popp, D.** (2005) "Uncertain R&D and the Porter Hypothesis", *Contributions to Economic Analysis & Policy*, Vol. 4, N° 1, Art. 6, available at <http://www.bepress.com/bejeap/contributions/vol4/iss1/art6>

**Requate, T.** (2005) "Timing and Commitment of Environmental Policy, Adoption of New Technology, and Repercussions on R&D", *Environmental & Resource Economics* Vol. 31, pp. 175-199

**Requate, T.** (2005) "Dynamic incentives by environmental policy instruments—a survey", *Ecological Economics*, Vol. 54, pp. 175-195.

**Roberts, M. et A. Spence** (1976) "Effluent Charges and Licenses Under Uncertainty," *Journal of Public Economics*, Vol. 5, pp. 193-208.

**Roberts K., et M.L. Weitzman** (1981) "Funding Criteria for Research, Development, and Exploration Projects", *Econometrica*, Vol. 49, No. 5, pp. 1261-1288.

**Rosenkopf, L. et A. Nerkar** (2001) "Beyond local search: Boundary-spanning, exploration, and impact in the optical disk industry". *Strategic Management Journal*, Vol. 22, pp. 287-306.

**Scherer, F.M. et D. Harhoff** (2000) "Technology policy for a world of Skew-distributed outcomes", *Research Policy*, Vol. 29, pp. 559-566.

**Schmutzler, A.** (2001) "Environmental Regulations and Managerial Myopia", *Environmental and Resource Economics*, Vol. 18, N° 1, pp. 87-100.

**Shittu E. et E. Baker** (2009) "Optimal Energy R&D Portfolio Investments in Response to a Carbon Tax", *IEEE Transactions on Engineering Management*.

**Sidhu, J. S., H. R. Commandeur et H. W. Volberda** (2007) "The Multifaceted Nature of Exploration and Exploitation: Value of Supply, Demand, and Spatial Search for Innovation", *Organization Science*, Vol. 18, No. 1, pp. 20-38.

**Simpson D. et Bradford, R. L.** (1996) "Taxing Variable Cost: Environmental Regulation as Industrial Policy", *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol, 30, pp. 282-300.

**Sinclair-Desgagné B.** (1994) "La Mise en Vigueur des Politiques Environnementales et l'Organisation de la Firme », *Revue d'analyse économique*, Vol. 70, N° 2, pp. 211-224.

**Sinclair-Desgagné B. and L. Gabel (1997)** "Environmental Auditing in Management Systems and Public Policy," *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 33, pp. 331-346.

**Sinclair-Desgagné, B. (1999)** "How to Restore Higher-Powered Incentives in Multi-Task Agencies", *Journal of Law, Economics, and Organization*, Vol. 15, N° 2, pp. 418-433.

**Stavins, R. (1996)** "Correlated uncertainty and policy instrument choice", *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 30, N° 2, pp. 218-232.

**Stavins R. N. (2003)** "Market-Based Environmental Policies: What Can We Learn from U.S. Experience (and Related Research)?", *KSG Faculty Research Working Paper* 03-031.

**Sutton R.S. et A.G. Barto (1998)** *Reinforcement Learning: An Introduction*, MIT Press, Cambridge, MA.

**Tarui N. et S. Polasky (2005)** "Environmental regulation with technology adoption, learning and strategic behavior", *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 50, pp. 447-467.

**Thomke, S.H. (1997)** "The role of flexibility in the development of new products: An empirical study", *Research Policy*, Vol. 26, pp. 105-119.

**Trigeorgis, L. (1996)** *Real Options: Managerial Flexibility and Strategy in Resource Allocation*, Cambridge: MIT Press.

**Ulph A. et D. Ulph (2009)** "Optimal Climate Change Policies When Governments Cannot Commit", *Discussion Paper*, School of Economics and Finance, University of St. Andrews

**Vassolo, R. S., J. Anand et T. B. Folta (2004)** "Non-Additivity in Potfolios of Exploration Activities: A Real Options-Based Analysis of Equity Alliances in Biotechnology", *Strategic Management Journal*, Vol. 25, pp. 1045-1061.

**Weitzman, M. L. (1974)** "Prices vs. Quantities", *Review of Economic Studies*, Vol. 41, pp. 477-491

**Weitzman, M.L. (1979)** "Optimal Search for the Best Alternative", *Econometrica*, Vol. 47, No. 3, pp. 641-654.

**Weitzman M. L., W. Newey et M. Rabin (1981)** "Sequential R&D Strategy for Synfuels", *The Bell Journal of Economics*, Vol. 12, No. 2, pp. 574-590.

**Xepapadeas, A. et de Zeeuw, A. (1999)** "Environmental Policy and Competitiveness: The Porter Hypothesis and the Composition of Capital", *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 37, pp. 165-182.