



Conseil Français de l'Énergie

WORLD ENERGY COUNCIL



Modèles de l'énergie et nouvelles théories du progrès technique

Paul Zagamé

Université de Paris1

Laboratoire ERASME / Ecole Centrale Paris

**La recherche en économie,
source de la décision politique et stratégique
– l'exemple de l'énergie –**

Paris, mercredi 3 décembre 2008

Le Conseil Français de l'Énergie

Le Conseil Français de l'Énergie est le comité national français du Conseil Mondial de l'Énergie ; c'est une association dont les membres sont les principales entreprises et organisations – institutions, associations - françaises ayant un intérêt scientifique, technique ou industriel à participer à des réflexions portant sur les questions énergétiques au niveau mondial.

Le Conseil Français de l'Énergie assure la présence française au sein du Conseil Mondial de l'Énergie et représente ses Membres dans toutes les activités internationales du Conseil Mondial de l'Énergie. Le Conseil Français de l'Énergie étudie toutes les questions relatives à la fourniture et l'utilisation durables de l'énergie ; il encourage les recherches se rapportant à ces mêmes questions.

Conseil Français de l'Énergie, comité membre du Conseil Mondial de l'Énergie

3 rue Treilhard -75008 Paris – France

Tel + 33 1 44 95 16 90 - Fax +33 1 44 95 16 97

www.wec-france.org

MODELES DE L'ENERGIE ET NOUVELLES THEORIES DU PROGRES TECHNIQUE

Paul ZAGAME
Université de Paris1
Laboratoire ERASME/Ecole Centrale Paris
Centre d'Analyse Stratégique

J'exprime ma gratitude envers le Conseil Français de l'Energie pour son aide qui me permet de présenter cette communication.

Les personnes à remercier sont, par ailleurs, si nombreuses que je ne peux pas dans le cadre de cette brève contribution les citer toutes ; je remercie donc tous ceux qui aiment les modèles, ...les Top comme les Bottom...

SOMMAIRE

RESUME	3
INTRODUCTION.....	4
1-CARACTERISATIONS ET UTILISATIONS DES MODELES DE L'ENERGIE	5
1.1-DEUX FAMILLES DE MODELES COMPLEMENTAIRES ET UNE HYBRIDATION ENCORE INCERTAINE.....	5
1.1.1- <i>Les modèles top down : une famille diversifiée</i>	5
1.1.2- <i>Qui conduit à des résultats qualitativement identiques</i>	7
Des substitutions :	7
Des délais	7
De la flexibilité des prix	7
Des effets revenus, et des effets de richesse.	7
1.1.3- <i>Les modèles bottom up : une complémentarité partielle avec les précédents</i>	8
1.1.4- <i>L'hybridation des modèles</i>	9
1.1.5- <i>Les difficultés du dialogue</i>	10
1.2-L'UTILISATION DES MODELES A TRAVERS L'EXPERIENCE EUROPEENNE.....	10
1.2.1- <i>La « famille » de modèles européens</i>	11
1.2.2- <i>L'utilisation des modèles</i>	12
2-LA CONFRONTATION AU RENOUVEAU DE LA THEORIE ECONOMIQUE.....	14
2-1.DE NOUVELLES VUES SUR LA CROISSANCE ET LE PROGRES TECHNIQUE... ..	14
2-1.1- <i>La croissance « débloquée » devient endogène</i>	15
2-1.2- <i>Les externalités au secours de la cohérence économique</i>	15
2.1.3- <i>Controverses sur les rendements, mais impulsion sur les études du progrès technique endogène et sur les externalités</i>	16
2.2-...ONT IMPOSE A LA MODELISATION DE NOUVEAUX CHANTIERS	16
2.2.1- <i>L'endogénéisation dans les modèles top down</i>	17
L'induction par la variable connaissance.....	17
Les biais de progrès technique.....	19
Substitution ou progrès technique	20
2.2.2- <i>L'endogénéisation du progrès technique dans les modèles technologiques (bottom up)</i>	20
La réconciliation des deux approches.....	21
3-DES OPPORTUNITES ET DES RISQUES.....	22
3.1- L'APPROFONDISSEMENT DES MODELES PERMET DE NOUVELLES EVALUATIONS	23
3.1.1- <i>Les nouvelles évaluations</i>	23
3.1.2- <i>Des évaluations de nouvelles politiques</i>	25
3.2-LES RISQUES	25
3.2.1- <i>Les risques techniques</i>	26
De la contrainte de calcul à la contrainte statistique	26
3.2.2- <i>L'acceptabilité de la modélisation économique</i>	27
CONCLUSION	30
BIBLIOGRAPHIE.....	31

RESUME

Après avoir brièvement présenté la famille des modèles de l'énergie et la pratique européenne de construction et d'utilisation des modèles, cette contribution, en s'appuyant sur un domaine de l'analyse économique qui s'est beaucoup renouvelé, le progrès technique et l'économie de la connaissance, se propose de présenter les chantiers actuels ou que l'on peut imaginer dans le futur pour incorporer les nouvelles théories dans les modèles. Les conséquences pour les évaluations des politiques de l'utilisation des nouveaux instruments sont ensuite présentées. La contribution se termine par les difficultés liées aux questions de statistiques et à l'acceptabilité des nouveaux instruments par les partenaires sociaux.

INTRODUCTION

L'engouement pour les modèles de l'énergie provient de leur utilité et de leur aptitude à, sinon répondre, du moins à éclairer, de nombreuses questions sur les politiques de l'énergie. Les travaux de développement, et donc leur évolution, sont dynamisés par l'importance de nouvelles interrogations politiques, mais aussi par des progrès à la fois de la théorie économique et des informations statistiques disponibles.

Aujourd'hui, on assiste à une conjonction remarquable entre, d'un côté, l'évolution de la toile de fond théorique de l'analyse des phénomènes dits structurels, c'est-à-dire de long terme tels que l'énergie, l'environnement, la recherche et d'un autre côté, les préoccupations des politiques économiques. Le renouveau de l'environnement théorique, c'est assurément « la révolution » de la croissance endogène et tout le cortège de travaux qu'elle a suscités sur les externalités de connaissance, sur l'endogénéisation du progrès technique et les conséquences qu'elle a entraînées sur la vision du long terme. Les politiques économiques se sont, du moins avant la crise financière, orientées vers les défis structurels importants que vont affronter les pays européens, au premier rang desquels figure la démographie, mais aussi les approvisionnements énergétiques et les normes environnementales contraignantes. La réponse à ces défis se devait, entre autres, de mobiliser un avantage comparatif qu'a exploité durant longtemps la vieille Europe : la connaissance ; pour ces raisons, la stratégie de Lisbonne est « de faire de l'Europe la zone économique la plus compétitive », et « fondée sur la connaissance » ; à cette stratégie fait écho l'objectif de Barcelone de 3% d'effort de R&D, l'un des deux piliers de la connaissance avec le capital humain. Ainsi, les préoccupations de la politique rejoignaient les orientations de la théorie qui les avait précédées. Mais on sait également que, dans le domaine des politiques de l'énergie et dans celui de l'environnement, le progrès technique joue un rôle considérable. Cependant, contrairement à la progression de la théorie dans ce domaine, la modélisation économique a tardé à incorporer ces avancées : le progrès technique est resté pendant longtemps « exogène » ou en tout cas endogénéisé de façon sommaire. Cette situation limite l'analyse des politiques économiques, la seule réponse des agents économiques face à une augmentation du prix de l'énergie étant alors des substitutions. Un défi pour la modélisation énergétique est donc l'intégration du progrès technique et nous centrerons notre exposé sur cette idée.

Nous commencerons par présenter les principaux mécanismes à l'œuvre dans des modèles traditionnels tout en montrant leur utilité pour la décision dans le cadre des pays européens.

Puis nous mentionnerons la nouvelle vision de la croissance endogène, ses conséquences sur l'analyse du progrès technique (externalités et endogénéisation) ainsi que les « chantiers » ouverts ou à ouvrir pour incorporer ces nouvelles théories.

Dans une troisième partie, nous montrerons les modifications qu'elles ont entraînées pour l'analyse des politiques économiques : révision des évaluations, évaluation des nouvelles politiques fondées sur la connaissance ; puis nous envisagerons les risques que doit affronter aujourd'hui la modélisation : défis techniques, acceptabilité...

1-CARACTERISATIONS ET UTILISATIONS DES MODELES DE L'ENERGIE

Nous allons ici présenter de façon sommaire la typologie des modèles de l'énergie, qui est bien admise, et qui divise les modèles en *top down* (de l'économiste), *bottom up* (technologique ou de l'ingénieur) et modèles hybrides.

Puis nous présenterons quelques utilisations dans un contexte particulier, celui des politiques européennes de l'énergie.

1.1-DEUX FAMILLES DE MODELES COMPLEMENTAIRES ET UNE HYBRIDATION ENCORE INCERTAINE

1.1.1-LES MODELES TOP DOWN : UNE FAMILLE DIVERSIFIEE...

Les modèles de « haut en bas » partent d'un équilibre macro économique ou macro sectoriel qui est progressivement désagrégé.

Les modèles *top down* décrivent donc *a priori* le système énergétique à partir de fonctions de production, où l'énergie figure de façon plus ou moins détaillée, comme un facteur de production substituable ou complémentaire avec d'autres facteurs comme le travail et les autres produits intermédiaires. Dans les représentations traditionnelles de ces modèles, ces fonctions de production sont à progrès technique exogène, c'est ainsi qu'apparaît dans les simulations un *trend* d'efficacité énergétique autonome¹, c'est-à-dire, indépendant des conditions économiques prévalentes. L'endogénéisation n'est apparue que plus tardivement.

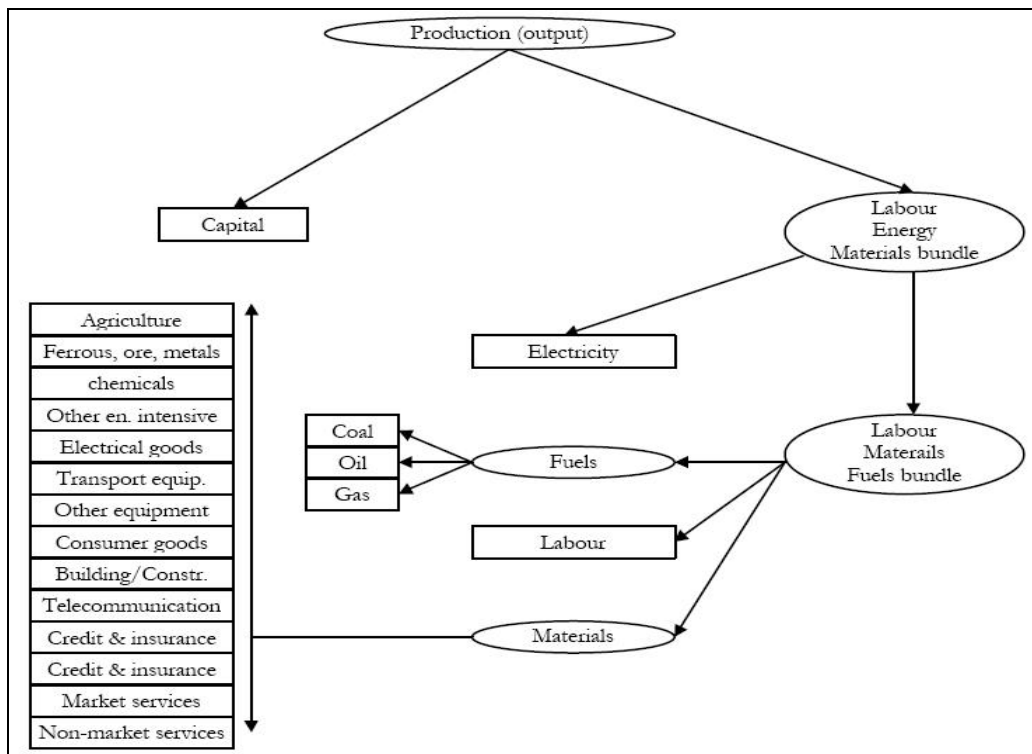


Figure 1: Fonction de production du modèle GEM-E3

¹ Et sur l'ensemble des autres facteurs de production.

L'offre d'énergie est généralement traitée comme l'offre des autres biens, avec plus ou moins de détail, mais surtout, avec des hypothèses simplificatrices rendues également nécessaires par les travaux économétriques et de simulation.

La demande, est constituée par les ménages qui, également, vont utiliser l'énergie en espérant des substitutions dans le cadre d'une fonction d'utilité implicite ou explicite, certaines complémentarités étant introduites entre la consommation d'énergie et la demande d'équipement (automobiles, électroménager).

Nous proposons ici un classement de ces modèles (cf. figure 2 : caractérisation des modèles), en fonction du caractère plus ou moins théorique qui s'oppose généralement à leur contenu en données empiriques, c'est-à-dire fondées sur des séries chronologiques :

- Tout en bas, les modèles économétriques qui sont estimés à partir de données chronologiques², ou données de panel, mais ayant un fort contenu chronologique. En général, les spécifications sont dérivées de formes fonctionnelles issues de la théorie économique, mais les critères de robustesse, qui influencent les choix des spécifications, distendent les relations finalement choisies de la théorie encore que, cela est de moins en moins le cas : les équations du bloc production, bien qu'estimées, sont issues d'une maximisation stricte. Les premiers modèles économétriques étaient associés au paradigme « néo-keynésien » en raison d'un mode de détermination des prix, en concurrence monopolistique, qui n'assure pas l'équilibre sur le marché ; mais cela a changé en raison des modifications du bloc offre. Les modèles les plus intéressants sont des modèles détaillés où l'interrelation entre les secteurs est assurée par un ensemble de matrices (*input-output*, branches produits d'investissement et très récemment, flux technologiques). Les modèles calculent à tous les niveaux : production, prix, compétitivité, emploi et chômage global.
- Ensuite, un peu plus haut, les modèles d'équilibre général, plus proches du comportement rationnel, parce que les mécanismes fondamentaux s'appuient sur la maximisation de l'utilité des consommateurs, celle des profits du producteur et parce que les équations du modèle sont strictement déduites des conditions d'optimalité de ces comportements. Les prix assurent un équilibre sur tous les marchés. Ces modèles sont donc plus proches de la théorie dominante³, en revanche, ils sont plus éloignés des données statistiques. En effet, ils ne sont pas, en général, estimés par l'économétrie mais « calibrés » sur des séries statistiques qui n'ont pas besoin d'avoir un contenu chronologique aussi fort. Les modèles les plus intéressants pour les politiques de l'énergie sont très détaillés, l'ensemble des interrelations étant décrites par une « *Social Accounting Matrix* » (S.A.M.)⁴. Les modèles sont, la plupart du temps gérés sous le logiciel GAMS qui est adapté aux problèmes d'optimisation ; de nombreux modèles s'appuient sur la base de données GTAP⁵. Ces modèles calculent les mêmes variables que précédemment sans le chômage, mais avec le bien être.
- Les modèles d'équilibre général ultra rationnels, où l'optimisation s'applique à la détermination des anticipations dites rationnelles, c'est-à-dire que l'agent choisit la meilleure anticipation, compte tenu de toute l'information disponible, contrairement aux deux familles précédentes de modèles, où les agents formulent des anticipations adaptatives, c'est-à-dire

² Pour tout ce qui a trait à l'économétrie de l'énergie, on pourra consulter KEPLER and alii (2006).

³ En particulier, comme les fonctions d'utilité sont explicitées, on peut calculer les variations de bien être.

⁴ Les SAM décrivent à la fois les relations de flux et de stock entre les différents agents

⁵ Pour plus d'information cf. Global Trade, Assistance, and Production: The GTAP 5 Data Package, Centre for Global Trade Analysis, Purdue University.

une extrapolation lissée de réalisations passées de la variable anticipée. Les anticipations sont rationnelles pour les modèles stochastiques (espérance conditionnelle). Cette espérance conditionnelle devient la véritable trajectoire du modèle lorsque l'on passe à un univers déterministe. Il s'agit donc de modèles à anticipations parfaites. Ces modèles à anticipations parfaites ne peuvent pas être résolus de façon récursive, année après année, mais de façon simultanée sur toute la période de projections. Cela fait passer le nombre de variables à résoudre à $N \cdot T$ (N nombre de variables du modèle pour T périodes de projection). Pour ces raisons, le cœur macroéconomique à anticipations parfaites est de taille réduite.

1.1.2-QUI CONDUIT A DES RESULTATS QUALITATIVEMENT IDENTIQUES.

Malgré des différences entre les modèles *top down*, on assiste à une logique de fonctionnement qui est qualitativement identique. Un choc sur les prix de l'énergie ou du carbone (taxes, permis aux enchères) va entraîner des effets macro économiques et des coûts qui vont dépendre :

Des substitutions :

- Entre composants énergétiques ;
- Entre énergie et autres facteurs de production ; la complémentarité investissement-énergie étant importante pour les résultats sur l'emploi ;
- Entre les différents biens de consommation des ménages.

Les élasticités de substitution vont rendre plus ou moins aisé l'ajustement aux nouveaux prix. Elles sont, en général, plus élevées sur les modèles d'équilibre général, qui sont calibrés, que sur les modèles économétriques.

Des délais

Il s'agit des délais de formulation de prévisions pour les modèles à prévisions adaptatives (au bout de combien de temps une variation va-t-elle être répercutée dans la variable prévue ?) et de délais de réalisation des décisions.

En définitive, la plus ou moins grande facilité d'adaptation au nouveau système de prix, et donc le coût primaire de la hausse de prix, va dépendre des élasticités de substitution et de l'ensemble des délais d'ajustement : l'adaptation est en général moins coûteuse dans les modèles d'équilibre général.

De la flexibilité des prix

Elle va jouer aussi un rôle important pour les ajustements ; une baisse de la demande aura moins d'effets négatifs si les prix sont flexibles, car on gagne en compétitivité ce que l'on perd en demande intérieure. Cette flexibilité est évidemment plus grande dans les modèles d'équilibre général.

Des effets revenus, et des effets de richesse.

Ils vont conditionner la demande, et donc l'équilibre macro économique dans un premier temps et peuvent rétroagir sur les prix et les salaires dans un deuxième temps. Par conséquent, les modes de redistribution d'accroissements des taxes sur le carbone, ou des permis émis aux enchères, vont avoir de l'importance. L'éventuelle indexation des salaires sur les prix va également peser beaucoup dans l'ensemble macro économique. Les modèles économétriques, de

tradition néo keynésienne, sont plus sensibles aux effets revenus. Dans le cas de modèles d'anticipations parfaites, on doit mentionner ici un mécanisme important de l'équilibre macro économique : l'effet richesse qui va conditionner la consommation des ménages. Cet effet s'appuie sur l'ensemble des revenus actualisés du consommateur prévus de façon exacte, compte tenu des variables de politique économique. Les effets d'annonce des politiques économiques et les effets d'éviction deviennent importants, dans la mesure où le consommateur ultra rationnel, sait bien qu'une dépense de l'Etat aujourd'hui se paiera par un prélèvement d'impôt plus tard.

De l'ensemble de ces mécanismes, on peut dire que, qualitativement, tous ces modèles donnent les mêmes résultats, avec des différences quantitatives, dues à une pondération différente des effets que nous avons mentionnés ; en particulier, ils conduisent presque tous à la mise en œuvre d'un double dividende emploi/environnement (modèles économétriques) ou bien être/environnement (modèles d'équilibre général) pour une politique de réduction de CO² assise sur la taxe ou des permis aux enchères, (dont la redistribution s'effectue par un allègement de cotisations sociales à la charge de l'employeur). Enfin, notons que ces modèles ne peuvent pas décrire de façon détaillée les technologies de l'énergie.

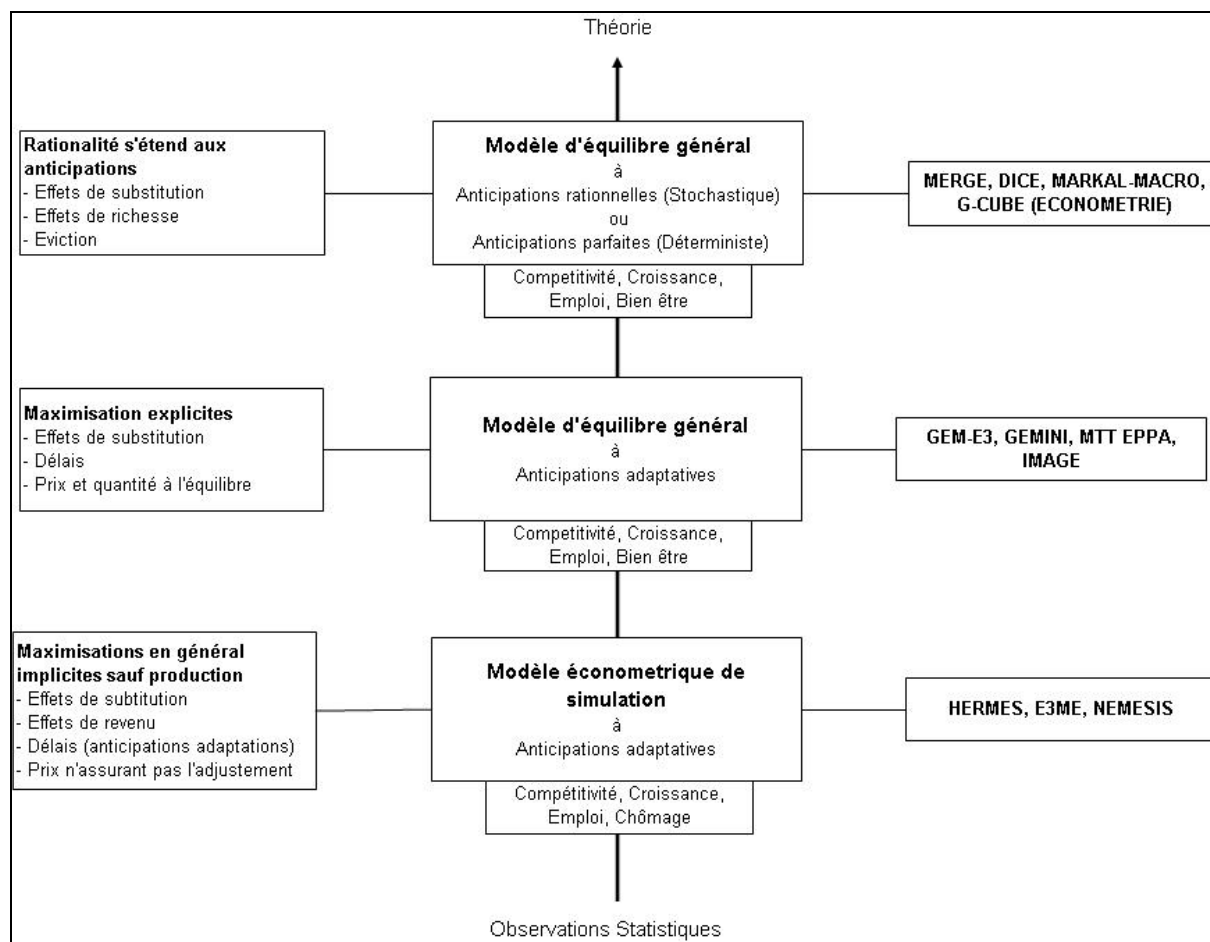


Figure 2: Caractérisation des modèles Top-Down

1.1.3-LES MODELES BOTTOM UP : UNE COMPLEMENTARITE PARTIELLE AVEC LES PRECEDENTS

Ce sont des modèles qui s'appuient au départ sur une description entièrement détaillée des technologies ; c'est ainsi que le modèle TIMES comporte plus de mille technologies différentes. Tout l'ensemble de production, conversion et utilisation de l'énergie est décrit avec précision. Ces modèles peuvent être également classés par ordre croissant de « rationalité ».

Il y a d'abord les modèles de simulation qui s'appuient sur une description du processus de décision et de fonctionnement des marchés. Ainsi le mécanisme du modèle POLES s'inspire du processus de décision en rationalité limitée cher à SIMON (1955) et qui remplace l'objectif de maximisation par la recherche d'un niveau de satisfaction désiré.

Les modèles d'optimisation s'appuient sur des comportements de maximisation de profit, ou de minimisation de coût et sur la programmation mathématique pour mobiliser les potentialités de gains d'efficacité technologique. Enfin, les modèles ultra rationnels sont fondés en plus sur des anticipations parfaites.

Les résultats de ces modèles portent principalement sur l'offre et la demande détaillées d'énergie, le prix de l'énergie, les coûts de réduction des émissions : coûts marginaux et coûts totaux (sans retour macro économique).

Si l'on compare les résultats de tous ces modèles, on peut constater que, en général, les modèles de simulation conduisent à un processus plus lent d'adaptation à un choc de prix (POLES). De toutes les façons, tous ces modèles ont besoin pour fonctionner d'un scénario macro économique de référence ; Comme les modèles « *top down* » sont insuffisamment détaillés sur l'énergie, on pourrait penser une complémentarité entre ces deux types d'instruments ; en fait les choses sont beaucoup plus compliquées car comme le remarquent GRUBB and alii (1993), puis un rapport de l'IPCC de 2001, le coût des politiques de lutte contre le changement climatique est souvent plus faible pour les modèles « *bottom up* » et cela n'est pas entièrement imputable à l'absence de retour macro économique mais aussi à la plus grande adaptabilité des modèles technologiques ; cela laisse augurer des difficultés de raccordement entre les deux instruments.

Les modèles Bottom up :	
<u>Simulation</u>	<u>Optimisation</u>
POLES	MARKAL
MEDEE	EFOM
	PRIMES
	TIMES

1.1.4-L'HYBRIDATION DES MODELES

Récupérer le meilleur de chacun des deux modèles, tel est, au fond, l'intention qui préside à l'utilisation de deux instruments appartenant à chacune des deux familles. Dans l'exercice d'hybridation des modèles, on peut trouver plusieurs manipulations différentes cf. BOEHRINGER et alii (2003), LOULOU (2005):

- Tout d'abord, prolonger « vers le bas » un modèle macro sectoriel par un modèle énergie, décrivant de façon détaillée les technologies, mais cette opération est limitée par la lourdeur de la mise en œuvre ; notons que les modèles GEM E3 (équilibre général) et NEMESIS (économétrique) possèdent un tel module.
- Pousser vers le haut un modèle *bottom up*, c'est le cas par exemple de MARKAL, qui a été prolongé par un module macro économique très agrégé (un seul secteur).
- Enfin, il y a la possibilité de faire dialoguer deux modèles, ou plus, de façon décentralisée en organisant un linkage par les itérations ; il convient, dans ce cas, de définir une hiérarchie entre les variables qui sont calculées simultanément par les deux modèles. Une solution

extrême à ce linkage peut être de construire une interface entre les deux modèles en déterminant un module de calage assurant la cohérence des variables. Le module définit pour chacun des niveaux les variables qui doivent être prépondérantes dans le dialogue avec l'autre niveau et « caler » les variables dépendantes.

1.1.5-LES DIFFICULTES DU DIALOGUE

Il n'est pas assuré, bien au contraire, que les mécanismes des deux modèles soient totalement cohérents (sur la substitution de technologie par exemple) et le dialogue peut dégénérer en une résultante qui n'a pas de signification. D'ailleurs, la convergence même n'est pas assurée. Une façon d'assurer une compatibilité serait en fait de tenir compte de l'information contenue dans les modèles technologiques pour, soit calibrer les fonctions de production CES⁶ des modèles d'équilibre général, soit contraindre les coefficients des fonctions de production des modèles économétriques ainsi que les fonctions de demande. Le problème essentiel provient de ce que les données de l'ingénieur sont rarement cohérentes avec les données économiques qui assurent les équilibres ressources emplois des S.A.M (Social Accounting Matrix) pour les modèles d'équilibre général ou ceux des tableaux *inputs outputs* des comptes nationaux pour les modèles économétriques. Du coup, toute tentative de raccordement ou d'hybridation est un cas d'espèce, une tentative isolée, qui tient compte de la spécificité du problème.

Pour cette raison, SUE WING (2008) propose une méthode générique, ayant une portée plus générale, qu'il applique au secteur électrique américain. Cette méthode qui rend compatible les données issues des deux sources, semble prometteuse et l'on peut penser que ces travaux sur le couplage et l'hybridation des modèles, n'en sont qu'à leur début si l'on en juge par les besoins de mise en cohérence de modèles s'appliquant à des domaines différents (climat, aménagement du territoire, forêt, agriculture etc.).

1.2-L'UTILISATION DES MODELES A TRAVERS L'EXPERIENCE EUROPEENNE

L'abondance de la littérature témoigne de l'ampleur du sujet.

Différents types de contribution ont été réalisées, commandées soit par des instances administratives, c'est le cas du rapport de GIRAUD (2002), pour la France en mars 2002 sur le thème « effet de serre : modélisation économique et décision publique » réalisé à la demande du Commissaire au Plan ; soit lors des conférences internationales (par exemple *Energy Modelling Forum* pour la comparaison de modèles).

Nous choisissons l'expérience européenne, car elle est intéressante de plusieurs points de vue : d'abord la politique énergétique a été au centre des préoccupations de la Commission européenne dès le début de la Communauté, (CECA puis EURATOM) et l'analyse et l'évaluation des politiques énergétiques, un sujet important de recherche ; ensuite, le niveau européen est le niveau adéquat pour réaliser des investissements d'infrastructures lourds, que sont aujourd'hui les gros modèles, et pour les financer partiellement, en cohérence avec le principe de « subsidiarité » ; enfin, il existe dans les Directions de la recherche de la Commission des « officiers scientifiques⁷ » qui vont jouer un rôle très important de transferts d'informations entre, d'un côté, les décideurs et d'un autre côté les scientifiques et les modélisateurs, ce transfert ayant lieu dans les deux sens. Ces officiers orientent les programmes de recherche en s'appuyant sur les besoins des politiques, puis en définissant des « appels à propositions » au sein desquels les scientifiques peuvent répondre avec des degrés de liberté importants pour ne pas brider la

⁶ Fonction de production à élasticité constante.

⁷ Mauvaise traduction de « *scientific officer* »

recherche ; dans l'autre sens, ils transfèrent⁸ les résultats des recherches vers les décideurs ou les partenaires (membres d'assemblées, associations etc.). Mais il y a une autre raison, moins avouable, à ce choix, c'est l'existence d'un bon ouvrage de synthèse sur le sujet ROSSETTI (2008).

Les programmes européens ont donc abouti à la construction d'instruments qui sont aujourd'hui très utilisés et qui ont fourni à l'Europe une capacité d'expertise lui ayant permis de rattraper le retard avec les U.S.A. Nous présentons d'abord la famille des modèles européens puis les traits saillants de leur utilisation.

1.2.1-LA « FAMILLE » DE MODELES EUROPEENS

Elle est relativement étendue, dans la mesure où elle recouvre à peu près toutes les catégories précédemment mentionnées.

Dans les modèles économiques, on peut identifier trois modèles par ordre d'apparition HERMES (1985), E3 ME (1998) NEMESIS (2002) et un modèle d'équilibre général calculable GEM E3 (1996). Ces modèles ont été construits par des équipes européennes dans des réseaux où les Français et les Grecs (CAPROS P. et KOUVARITAKIS N. (N.T.U.A.)) ont joué un rôle important. Remarquons que, d'un point de vue méthodologique, il y a des modèles économétriques de simulations (plus réalistes) que de modèles d'équilibre général d'optimisation plus normatifs. Si le réalisme des premiers est souvent critiqué par ce que le choix des relations économétriques conduit à des spécifications aux propriétés parfois mal justifiées, en revanche ils ne souffrent pas de la critique formulée par GRUBB et alii (1993) d'assurer l'allocation optimale des ressources automatiquement.

Les modèles technologiques de l'ingénieur ont commencé à être élaborés par des programmes européens dès la fin des années 70 et, dès le début des années 80. Deux modèles étaient disponibles et ont joué un rôle important : le modèle d'offre EFOM, modèle déterminant par la programmation linéaire, l'offre d'énergie primaire pour atteindre au moindre coût un niveau de demande donné ; le modèle de demande MEDEE qui est un modèle de simulation qui calcule la consommation d'énergie finale dans les grands secteurs consommateurs, industrie, résidentiel et tertiaire. La génération suivante de modèles est dites « intégrée » dans la mesure où elle traite simultanément de l'offre et de la demande d'énergie et donc des marchés qui vont jouer un rôle d'orientation important par l'intermédiaire des prix. Le modèle d'optimisation PRIMES en fait partie. Dans les réseaux européens qui ont construit ces instruments très utilisés, les Français (pas les mêmes que précédemment, puisqu'il s'agit maintenant de l'équipe de l'IEPE anciennement LEPII avec notamment CRIQUI P. et CHATEAU B. (ENERDATA)) et les Grecs, (les mêmes que précédemment) ont joué un rôle important ; là également on retrouve les deux catégories de modèles : d'optimisation PRIMES et de simulation POLES. Enfin signalons les « logiciels » de simulation pour les énergies renouvelables : SAFIRE et GREEN-X.

Quels sont les traits caractéristiques de toute cette famille de modèles ? Il en existe plusieurs :

⁸ Comprendons bien ici que ce transfert implique un énorme travail d'extraction et de mise en forme de résultats pour les rendre accessibles.

- Il s'agit de modèles répartis entre simulation et optimisation ; les premiers utilisent aujourd'hui des logiciels élaborés par leurs constructeurs (sauf POLES qui utilise TROLL) tandis que les seconds utilisent GAMS avec le solveur PATH.
- La génération la plus récente a été élaborée dans de grands réseaux européens cofinancés par les DG Energie et Environnement de la Direction Générale de la Recherche à partir d'appels à proposition.
- Contrairement aux premiers modèles, les modèles d'aujourd'hui sont de gros projets évolutifs à partir d'une architecture donnée, un peu comme le sont aujourd'hui de grands projets de l'aéronautique type Airbus. Ces modèles ont évolué depuis leur construction dans deux dimensions : l'intensité c'est-à-dire l'approfondissement d'un phénomène économique par exemple les externalités, le progrès technique endogène et cela sous la pression de la théorie, et l'extension tiré par l'évolution des politiques : séquestration du Carbone, biomasse, renouvelables etc.

Ces évolutions ont alourdi les modèles mais ont permis une expertise qui a été utile aux décideurs politiques.

1.2.2- L'UTILISATION DES MODELES

L'utilisation des modèles nécessite, tout d'abord, de définir un scénario prospectif qui peut être un scénario Business As Usual (B.A.U), sans politique complémentaire, ou un véritable scénario prospectif intégrant déjà des politiques complémentaires. Dans le premier cas, le B.A.U. est utilisé pour évaluer des politiques de l'énergie additionnelles (en écart par rapport à ce B.A.U.) dans le second cas, le scénario prospectif donne des informations quantitatives sur l'avenir et/ou révèle des problèmes du futur. Retenons donc qu'il y a deux types de simulations : en compte central et en compte variantiel.

Compte central des modèles de l'énergie:

- **Business As Usual, Scénario tendanciel sans politique additionnelles.**
- **Scénario de rupture, Scénario prospectif**
- **Scénario "Téléologique", Scénario "Back-Casting"**

Compte variantiel des modèles de l'énergie:

- **Marché de l'énergie, Offre-Demande**
- **Chocs de Prix**
- **Changement climatiques**
- **Pollutions liées au cycle de l'énergie**
- **Développement durable**
- **Retours variantes économiques sur l'énergie**

L'utilisation a été assez intensive ; disons tout d'abord que les modèles *top down* ont été utilisés, mais moins que les autres, pour les politiques de l'énergie ; en revanche, ils ont servi beaucoup à des questions économiques plus générales (Marché unique européen, stratégie de Lisbonne, objectif de Barcelone, Plan d'Actions Nationaux pour la Recherche, Evaluation des Programmes de recherche européens, Aménagement du territoire, Politique agricole commune, politique de la forêt, etc.). Par contre, les modèles *bottom up* ont été très utilisés de façon très abondante comme le rappelle D.ROSSETTI (2008), pour la préparation de Kyoto, pour répartir le « *burden sharing*⁹ » de la réduction des gaz à effet de serre, pour justifier le système européen d'échange de droits d'émissions, pour proposer des objectifs de l'après Kyoto, sans oublier l'utilisation de SAFIRE et GREEN-X pour les renouvelables. Tous ces travaux ont eu un effet comme nous le verrons plus tard, sur le processus de décision européen.

Sur l'aspect des scénarios de références, l'ouvrage de D.ROSSETTI montre que les prévisions des premiers modèles MEDEE et EFOM en 1985 à un horizon de 15 ans dans le cadre d'« Energie 2000 » GUILMOT et alii (1986) ont été réalisées pour l'ensemble des produits énergétiques avec une précision qui atteint 2%. En revanche, la composition des produits énergétiques a été mal prévue ; la consommation de gaz ayant été sous estimée dans la projection comparée à la réalisation, cette sous estimation a été compensée par une surestimation de la consommation de charbon et une large sous estimation de la pénétration des renouvelables. Cette situation s'explique par la non prise en compte de facteurs lors de la projection (gaz de la mer du nord, sensibilisation au changement climatique etc). Dans la seconde génération de modèles, POLES a été utilisé pour réaliser dans l'exercice WETO, une prospective sur la consommation mondiale d'énergie en 2050 (*European Commission World Energy Technology Outlook 2004-2005*, 2007). Les projections ont été comparées à celles de deux autres modèles, le modèle WEM (WEO rapport de l'IEA) et le modèle SAGE (IEO rapport du Département américain de l'énergie) pour les années 2010-2020-2030. Les prévisions de demande d'énergie sont très proches, celles réalisées par les U.S.A. sont un peu plus importantes mais explicables par un taux de croissance plus élevé. Les projections d'émissions de CO² en 2030 sont également concordantes bien que la combinaison entre les énergies, notamment sur les renouvelables et le nucléaire, diffère entre les trois projections. Cet exercice est donc plutôt de nature à crédibiliser les projections réalisées à partir de modèles.

Pour les exercices variantiels, plutôt que de reprendre les nombreux travaux des cas cités au début de cette section, je vous propose, afin de rendre l'exposé plus vivant, de vous raconter un exercice que j'ai personnellement vécu ; cette anecdote va constituer une bonne introduction à la troisième partie du papier. Il s'agissait en 1990 des travaux préparatoires au livre blanc de J.DELORS sur la croissance, la compétitivité et l'emploi. Nous avons présenté avec un officier scientifique et un chercheur qui occupe maintenant des fonctions éminentes dans l'institution qui nous accueille aujourd'hui, les résultats de simulations réalisées avec HERMES sur la taxe CO² ; il s'agissait à l'époque d'une, et peut-être de la première mise en évidence d'un double dividende emploi/environnement avec une taxe redistribuée sous la forme d'allègement de cotisations sociales des entreprises ; le dividende d'emploi était significatif à la condition de pratiquer une certaine rigueur salariale. Un mécanisme du modèle jouait un rôle important : la complémentarité investissement/énergie ; ainsi une diminution des consommations d'énergie induisait une baisse de l'investissement et donc pour maintenir un niveau de production donné, il est nécessaire de maintenir l'emploi. A la tribune, un ancien Ministre de l'Industrie nous répond que cette complémentarité investissement/énergie n'est pas visible dans les usines, prenant l'exemple d'un four à chaux ; ma réponse impudente et imprudente a été de dire que les fours à chaux ne sont pas macroéconomiques ! Un officier scientifique témoin de la scène a réalisé que dans l'immédiat

⁹ *Burden sharing* : répartition des efforts de réduction des émissions des gaz à effet de serre, entre les pays.

il était indispensable de prolonger ses modèles *top down* par une analyse détaillée des technologies et notamment celle des meilleurs techniques disponibles ; ce fut l'origine du Programme Compétence qui est, avant l'heure, une sorte d'hybridation d'un modèle *top down* et également une sorte d'endogénéisation du progrès technique puisque, dans cette recherche, la mise en oeuvre de nouvelles technologies dépend des conditions économiques générales (croissance, taux d'intérêt, inflation) et du prix de l'énergie.

Une autre expérience intéressante a été celle de l'extension du modèle GEM E3 dans le cadre du projet ExternE sur l'analyse économique des pollutions autres que celles du CO² (les dommages liés à ce gaz étant difficilement chiffrables) ; à savoir celles des polluants SOx, NOx, CFC, particules etc. En calculant avec une équipe pluridisciplinaire le taux de morbidité dû au cycle de l'énergie, en chiffrant les coûts associés à cette morbidité, on arrive à donner une expression monétaire aux variations d'utilisation des différents combustibles énergétiques et donc à rentrer dans la fonction d'utilité des variables environnementales.

J'ai voulu citer ces exemples, parce qu'ils me paraissent vraiment représentatifs de ces programmes de construction et d'utilisation des modèles ; les utilisations étant souvent liées à des approfondissements et à des extensions, lorsqu'elles sont financées par les programmes de recherche ; ils montrent que les modèles ne sont pas fermés à la pluridisciplinarité. En présentant ces cas, je souhaite que l'on n'oublie pas tous les acquis des modèles *bottom up*, trop brièvement cités au début de ce paragraphe et ... brusquement, je me rends compte que je ne respecte pas les lois de l'hospitalité en parlant de taxe sur l'énergie et de morbidité liée au cycle de l'énergie, dans cette enceinte où nous a accueilli le Conseil Français de l'Energie.... Mais patience, le progrès technique « endogène » va bientôt nous commander d'aider la recherche sur l'énergie.

2-LA CONFRONTATION AU RENOUVEAU DE LA THEORIE ECONOMIQUE.

Voilà donc à peu près 20 ans que Paul ROMER en deux articles de 1986 et 1990 ayant eu un retentissement considérable, a complètement renouvelé les visions du progrès technique et de la croissance qui devenait « endogène ». Le message relayé par l'article d'AGHION et HOWITT (1992), dans une perspective schumpétérienne, a débouché sur de très nombreux travaux académiques très simplificateurs, très élégants qui donnaient une vision très stylisée de cette nouvelle perspective ; les travaux appliqués et de modélisation¹⁰ ont, par contre, tardé à se développer, en dépit des enjeux cruciaux en termes de description de scénarios ou d'analyse des politiques structurelles ou de croissance. Nous examinerons tout d'abord ces nouvelles vues sur la croissance et le progrès technique, puis nous décrirons quels chantiers ces nouvelles vues doivent encore faire ouvrir ou développer.

2-1.DE NOUVELLES VUES SUR LA CROISSANCE ET LE PROGRES TECHNIQUE...

A partir des articles de ROMER (1986,1990), la croissance devenait « endogène » en ce sens que l'on peut, par des mesures appropriées, modifier les taux de croissance de long terme. Cela était principalement dû aux externalités et même si la croissance endogène fait controverse, les travaux qu'elle a entraînés sur le progrès technique sont aujourd'hui très utilisés.

2-1.1-LA CROISSANCE « DEBLOQUEE » DEVIENT ENDOGENE...

Dans la vision « classique » la croissance était exogène et dépendait du taux de croissance de la main d'œuvre et du taux exogène de progrès technique. Dans ce contexte, la seule façon d'augmenter la croissance est d'accroître le capital ; or, ce processus ne peut être que transitoire, les rendements marginaux décroissants du capital deviennent à un moment trop faible pour qu'il soit rentable d'investir. La croissance est donc bloquée et à long terme, exogène. Mais P.ROMER va remettre en question l'hypothèse de rendements décroissants, en ce cas l'accumulation du capital peut se poursuivre et il est possible de modifier durablement la croissance économique : les politiques structurelles peuvent avoir de l'effet à long terme. L'origine de cette croissance endogène, ce n'est pas nécessairement le progrès technique mais plutôt la non décroissance des rendements des facteurs accumulables ; à la limite un modèle de type AK¹¹ comme celui de KING et REBELO (1992) est à croissance endogène ; mais d'un autre côté il est difficile d'imaginer la non décroissance des rendements d'un facteur accumulable unique ; il est plus aisé d'obtenir cette non décroissance en envisageant plusieurs facteurs accumulables simultanément: le capital physique certes, mais aussi le progrès technique, les connaissances, et le capital humain. Une condition suffisante de croissance endogène c'est que la somme des rendements de ces facteurs ne soit pas inférieure à un ; ces facteurs constituent alors le « cœur de la croissance ».

Comprenons bien ici que cette hypothèse de croissance endogène, devrait modifier considérablement notre vision à long terme des scénarios économique-énergétiques, en modifiant la productivité des facteurs énergétiques et en faisant dépendre cette productivité des efforts de R&D. Il reste que cette productivité lorsqu'on adopte le point de vue de l'ingénieur doit être rapprochée de la mise en œuvre de technologies bien identifiées ou à paraître. C'est une difficulté évoquée ultérieurement.

2-1.2-LES EXTERNALITES AU SECOURS DE LA COHERENCE ECONOMIQUE.

L'hypothèse de rendements non décroissants, nécessaire à la croissance endogène, est, en général, incompatible avec l'équilibre micro économique ; pour réconcilier décroissance des rendements micro et non décroissance macro, l'idée importante a été d'introduire les « externalités » entre les deux, notamment les externalités de connaissance qui sont des transferts de connaissance entre agents économiques.

Prenons le cas de la R&D, la productivité, pour l'entreprise qui l'investit va dépendre de son effet sur sa propre activité d'innovation. Mais à cette productivité individuelle va s'ajouter la productivité sociale de cette recherche, résultant des effets des dépenses en R&D de cette entreprise sur l'activité innovante des autres entreprises. Ces effets appelés « *knowledge Spillovers* » ou « externalités de connaissances » prennent différents canaux : on distingue de ce point de vue deux sortes d'externalités (GRILICHES (1992)). La première, l'externalité de marché ou de rente, est lié à l'achat d'un bien incorporant de la R&D à un prix inférieur à celui reflétant sa pleine qualité¹². La deuxième notion (les véritables externalités) provient de transferts de connaissance entre agents, firmes, secteurs ou pays ne passant pas par le marché. Par exemple, un dépôt de brevet par un industriel, certes va protéger sa situation de monopole, mais il va également diffuser une information précise sur les caractéristiques de l'innovation, ce qui est un transfert de connaissance hors marché, qui par le jeu des imitations compatibles avec la définition du brevet, va accroître la productivité sociale de la recherche.

Les externalités ont été l'objet d'une large littérature, élément qui a permis de valider et d'estimer les écarts entre productivité industrielle et productivité sociale de la recherche. Les premières

¹¹ Avec K Capital et A rendements constants du Capital

¹² Par exemple, l'évolution des prix est inférieure à celle de la qualité des ordinateurs.

études appliquées à l'industrie sont celles de MANSFIELD (1977) qui trouvent un rendement social deux fois supérieur au rendement privé.

2.1.3-CONTROVERSES SUR LES RENDEMENTS, MAIS IMPULSION SUR LES ETUDES DU PROGRES TECHNIQUE ENDOGENE ET SUR LES EXTERNALITES.

L'hypothèse de rendements non décroissants a été vivement critiquée ; dans les premiers modèles de croissance endogène apparaissait un effet d'échelle ; le taux de croissance d'une économie dépendait de sa taille. Pour cette raison sont apparus des modèles de croissance « semi endogène » JONES (1995) avant que les raffinements de l'analyse permettent d'éliminer cet effet d'échelle dans la croissance endogène.

De nombreux travaux économétriques ont été aussi entrepris, pour tenter de valider ou de rejeter, l'hypothèse de rendements non décroissants des facteurs accumulables, pour savoir si la somme des exposants de ces facteurs est égale ou inférieure à l'unité. Une étude récente de PERALA (2008) confirme l'existence de rendements non décroissants, mais cela n'a pas toujours été le cas et l'importance des travaux de croissance endogène, tient aujourd'hui aux formidables développements qu'ils ont suscités sur l'endogénéisation du progrès technique et sur les externalités de connaissance.

L'endogénéisation du progrès technique, déjà ancienne dans la littérature macroéconomique, a trouvé un nouveau souffle depuis que celle-ci a été rattachée à la stratégie microéconomique des firmes sur les marchés comme par exemple dans le modèle de AGHION et HOWITT (1992), ce qui n'était pas le cas dans les études anciennes. Aujourd'hui, les endogénéisations macro économiques sont fondées sur l'effort de R&D et le capital humain, mais peu de modèles intègrent vraiment ces variables. Le modèle canonique de la croissance endogène s'appuie sur la décision de R&D qui peut conduire à des innovations de procédés ou de produits.

Pour les scénarios énergétiques, la décision endogène d'investir en R&D élargit beaucoup les possibilités d'analyse des comportements ; face à une augmentation du prix du carbone ou de l'énergie, les entreprises, par exemple, peuvent réagir en termes de choix de progrès technique et non plus simplement en termes de substitution. D.POPP (2001) a estimé la part de réaction en termes de substitution factorielle à 2/3 et la part de choix de progrès technique à 1/3 et l'on comprend que, la prise en compte de ce dernier facteur, permet de mettre en œuvre de nouvelles évaluations et même d'élargir le spectre de l'évaluation à des politiques principalement fondées sur la R&D. De même, les externalités de connaissance et leur chiffrage, ont été remis au premier rang des préoccupations des économistes de la production et du progrès technique.

2.2-...ONT IMPOSE A LA MODELISATION DE NOUVEAUX CHANTIERS

Tous ces chantiers ressortissent au même thème fédérateur : l'endogénéisation du progrès technique qui est encore traitée de façon relativement sommaire. Les résultats de l'endogénéisation du progrès technique sont généralement présentés dans deux dimensions : le taux du progrès technique (amplitude de l'accroissement de la productivité) et la direction du progrès technique (augmentation relative de la productivité d'un facteur par rapport à l'ensemble des facteurs). Pour les modèles de l'énergie, c'est principalement la productivité de ce facteur qui est observée, cela veut dire que l'on va s'intéresser aux progrès techniques économisant l'énergie. Le progrès technique neutre est celui qui augmente simultanément la productivité de tous les facteurs.

L'induction du progrès technique¹³, selon les modèles utilisés, dépend généralement, de deux types de grandeur : la variable connaissance que l'on trouve plutôt dans les modèles *top down* et la variable expérience ou apprentissage que l'on trouve plutôt dans les modèles *bottom up*.

¹³ Dans l'écriture des modèles déterministes car bien évidemment l'innovation est un processus aléatoire.

Nous examinerons successivement l'endogénéisation dans les modèles *top down*, puis dans les modèles *bottom up* ainsi que les pistes de réconciliation entre les deux approches.

2.2.1-L'ENDOGENEISATION DANS LES MODELES TOP DOWN

Nous examinerons trois points : l'induction par la variable connaissance, la différenciation des variables de connaissance pour l'analyse des biais et la séparation entre progrès technique biaisé et substitution.

L'induction par la variable connaissance

La variable « connaissance » est en principe une variable de stock immatériel qui, en fait, est très complexe puisqu'elle décrit pour une activité ou un secteur donnée, des accumulations de flux de diverses origines : R&D, formation du capital humain, qualifications et savoir faire. Ces flux émanent de l'activité ou de l'entreprise envisagée, mais aussi proviennent d'autres entités par l'intermédiaire des « externalités » : autres centres de formation, autres recherches et autres expériences y compris en provenance du public et de l'étranger. Pour ces raisons, le stock de connaissances n'est que partiellement contrôlable par l'entreprise ou le secteur où il agit. Toute variation de cette grandeur va induire une innovation et donc l'émergence d'un progrès technique. Cette variation peut-être due soit à un changement dans les externalités soit à une modification des variables que « commande » l'entreprise par exemple l'investissement en R&D, qui va, alors, accroître le stock de connaissances. Dans de nombreuses spécifications, la variable connaissance agit dans une fonction de production (cf. par exemple GRILICHES (1979) pour le stock de R&D). L'élasticité de la production à l'égard de ce nouveau facteur est importée de travaux économétriques relativement nombreux pour la variable de connaissance limitée à la R&D, (cf. MOHNEN et MAIRESSE (1999) par exemple).

On peut donc, en désignant par Y la production, KN la variable de connaissance, E l'énergie et F les autres facteurs écrire :

$$Y = Af(KN, E, F)$$

Ou encore

$$Y = A(KN)^\alpha f(E, F)$$

Il s'agit là d'un progrès technique neutre, au sens où il accroît de la même façon la productivité de tous les facteurs, nous discuterons plus tard le cas du progrès technique biaisé.

La construction de la variable connaissance va constituer un chantier important de la modélisation. Elle est difficile à calculer parce qu'elle se trouve au centre de différentes externalités. De nombreuses spécifications isolent la partie connaissance due aux efforts de R&D de celle imputable au capital humain. Dans ces cas celle-ci peut s'écrire pour le secteur *i*: (cf FOUGEYROLLAS et Alii (2005) et SUE WING (2006)).

$$\Delta KNOW_{it} = \underbrace{G(RD_{it}, KNOW_{it}, EXT)}_{\text{Accumulation}} - \underbrace{\delta KNOW_{it}}_{\text{Déclassement}}$$

Où $KNOW_{it}$ désigne le stock de connaissances du secteur i , $\Delta KNOW_{it}$ sa variation, RD_{it} le flux de R&D et EXT l'ensemble des externalités structurelles (provenant d'autres secteurs). La fonction d'accumulation de la connaissance est liée aux dépenses de R&D, mais également à l'ensemble de savoir déjà accumulé en raison d'externalités inter temporelles et structurelles mais la seule variable de commande contrôlée par l'entreprise est la dépense de R&D.

Plusieurs spécifications peuvent être retenues. Nous en donnons une, extraite des travaux de SUE WING (2006) et proche de celles de GEM E3:

$$\Delta KNOW_{it} = A.RD_{it}^{\alpha}.KNOW_{it}^{\beta}.EXT_{it}^{\chi}$$

Avec EXT_{it} décrivant les externalités de connaissance structurelles, c'est-à-dire provenant des autres activités ou secteurs et de l'échange. Celles-ci peuvent être prises en compte par les matrices de flux technologique de JOHNSON (2002) où les échanges de brevets jouent aujourd'hui un rôle essentiel. La somme des coefficients $\alpha+\beta+\chi$ va déterminer la convexité des rendements de la recherche ; α désigne les effets des externalités d'entraînement (positives) ou au contraire de congestion ou de duplication de la recherche (négatives) ; β traduit l'importance des externalités inter temporelles ; $KNOW_{it}$ étant le "géant" sur lequel se dresse le chercheur juché sur la pointe des pieds (RD_{it}). Mentionnons que, dans les externalités structurelles, figurent celles provenant des centres de recherche publique.

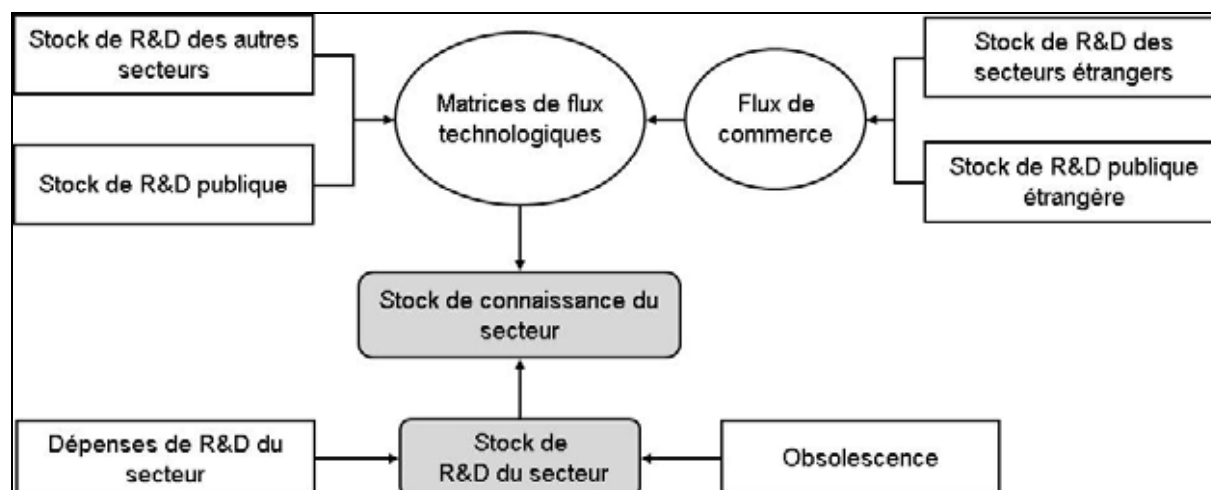


Figure 3: Calcul de la variable connaissance (source: modèle NEMESIS)

La variable capital humain liée au niveau de qualification et de formation de la main d'œuvre, apparaît souvent à côté des variables liées à la R&D. De nouvelles avancées théoriques ont focalisé l'attention sur les interrelations entre la productivité de la recherche et celle du capital humain et où le concept de frontière technologique, représenté par le système productif le plus performant¹⁴ (les U.S.A. en macro, concept que l'on peut aussi définir aussi au niveau sectoriel), joue un rôle important, cf. VANDENBUSSCHE et alii.(2006) et GRIFFITH et alii. (2003). Dans les pays les moins avancés, loin de la frontière technologique, l'investissement en R&D est plus productif ; en effet, cet investissement sert à imiter et diffuser les innovations des pays plus avancés (COHEN ET LEVINTHAL 1989). Près de la frontière technologique, ce processus de

¹⁴ Dans le sens où la productivité globale des facteurs est la plus élevée.

rattrapage n'est plus possible et par conséquent l'investissement en capital humain qui permet de véritables inventions, redevient nécessaire et donc très productif.

Les exemples nous prouvent que la littérature du progrès technique est encore en plein bouleversement et que le besoin de statistiques et de travaux économétriques complémentaires est plus que jamais nécessaire ; mentionnons pour résumer : le calcul des externalités de façon plus précise en utilisant les derniers travaux liés aux brevets ; l'explicitation de la relation entre capital humain et capital connaissance R&D dans la perspective de travaux de VANDENBUSSCHE et alii.(2006) mais à un niveau sectoriel ; enfin, plus tardivement, l'incorporation dans la variable de connaissance d'éléments plus qualitatifs telles que les variables organisationnelles (D.FORAY 2004).

Les biais de progrès technique

Afin de mieux analyser les biais du progrès technique induit, certains auteurs recommandent de calculer, lorsque cela est possible, une variable de connaissance par facteur de production ou, en tout cas, pour les modèles de l'énergie une variable de connaissance conduisant au progrès technique « *energy saving* » ; cela suppose que l'on puisse identifier clairement les variables de connaissances affectées à ce facteur ; en fait on verra qu'une des difficultés tient à ce que les dépenses de R&D, lorsqu'on les appréhende à un niveau sectoriel fin ne distinguent que peu souvent la R&D globale de celle qui est affectée à l'énergie. Une façon de contourner cette difficulté va consister à prendre comme variable proxy de la R&D énergie les brevets déposés dans ce domaine. La nouvelle fonction de production s'écrit :

$$Y = f[(E, KNE), (F, KNF)]$$

Ainsi peut-être représenté le progrès technique biaisé sur le facteur énergie avec E le facteur énergie, F les autres facteurs de production KNE et KNF les stocks de connaissances qui leur sont associés et Y la production.

Imaginons maintenant que, pour diverses raisons, que le prix de l'énergie augmente ; en ce cas à l'intérieur du panier E, KNE une substitution va s'opérer de E vers la partie « commandable » de KNE par exemple la R&D ou le capital humain propres à l'entreprise et affectés à l'énergie. Certaines études économétriques¹⁵ donnent des estimations de la substituabilité entre la connaissance et son facteur associé. Mais elles sont extrêmement rares.

En réalité, l'augmentation de la commande R&D énergie, dans le but d'accroître la variable connaissance, et donc de déclencher l'innovation, va avoir comme effet d'augmenter le coût de production et de réduire les rentes et le profit. Le résultat final sur la R&D est ambigu et va dépendre notamment de l'élasticité volume/prix de la demande de biens produits. Par conséquent, non seulement la hausse du prix de l'énergie risque de ne pas augmenter et même de diminuer l'effort total de R&D, mais elle peut aussi faire baisser la R&D consacrée à l'énergie. De plus, si l'on considère que l'offre de R&D est inélastique, alors ce phénomène risque de jouer encore davantage par un renchérissement des prix de la R&D.

Deux questions relèvent de cette analyse et ont trait aux conséquences de la hausse du prix de l'énergie : cette hausse entraîne-t-elle une hausse de la R&D énergie ? Sur ce sujet les travaux économétriques de D.POPP (2002) confirmés pour la France par PILLU et KOLEDA (2008) montrent de façon significative que la hausse du prix de l'énergie va entraîner une augmentation du nombre de dépôts de brevets sur les technologies « *energy saving* ». La hausse de la R&D énergie ne va-t-elle pas entraîner un effet « d'éviction » des dépenses de R&D consacrées à l'ensemble des autres facteurs de production c'est-à-dire de la R&D favorable à la compétitivité

et à la croissance ? Cet effet d'éviction ne va-t-il pas s'étendre à d'autres formes d'accumulation tel que l'investissement productif des entreprises ? Pour GOULDER et SCHEIDER (1999) il y a effet d'éviction (crowding out) sur la R&D des autres facteurs favorables à la compétitivité et à la croissance. Pour NORDHAUS (2002) il y a éviction jusqu'à l'investissement productif. Au contraire d'autres auteurs sont plus optimistes sur l'influence de la R&D « *energy saving* » sur les autres formes de recherche et notamment sur celles débouchant sur la compétitivité et la croissance. C'est le cas de BUONANNO et alii (2003) qui envisagent des effets d'entraînement (crowding in) sur les autres types de recherches ; dans ces derniers cas, l'endogénéisation du progrès technique renforce l'occurrence d'un double dividende pour les politiques de lutte contre les gaz à effet de serre.

Ces résultats contradictoires appellent à n'en pas douter de nouveaux travaux d'approfondissement sur les élasticités de substitution de tous les facteurs de production y compris les variables de connaissance. Une première tâche tient à la différenciation substitution-progrès technique.

Substitution ou progrès technique

En restant dans les modèles *Top down* utilisant une approche en termes de fonction de production, une des premières questions à examiner est la séparation entre substitution factorielle et changement technologique. La première s'inscrit dans un ensemble de virtualités de changements factoriels instantanés, tandis que le second s'inscrit dans le temps, ce qui conduit à des propriétés variantielles différentes des modèles.

Les économistes connaissent bien ces difficultés d'identification entre rendements d'échelle et progrès technique neutre d'un côté, et élasticité de substitution et biais de progrès technique, d'un autre côté. Une façon de circonvenir cette difficulté, a été d'utiliser pour représenter la production les fonctions de coûts flexibles, dans lesquels les biais de progrès technique sont identifiés comme les coefficients temporels des parts de facteurs. Un inconvénient à cette solution, c'est que ces fonctions à élasticité de substitution variables vont perdre en transparence et rendre plus délicates les interprétations économiques des politiques analysées, en termes de substitution et de revenu. Nous rencontrons là une des grandes difficultés récurrentes de la modélisation contemporaine, à savoir que les progrès dans l'analyse des phénomènes se paient souvent par un obscurcissement des mécanismes de modèles.

2.2.2-L'ENDOGENEISATION DU PROGRES TECHNIQUE DANS LES MODELES TECHNOLOGIQUES (BOTTOM UP).

Le progrès technique endogène dans les modèles technologiques apparaît essentiellement sous la forme de courbes d'expérience où le progrès technique dépend de l'expérience elle-même appréhendée par l'investissement brut ou la capacité brute cumulée. Ce progrès technique agit comme une baisse de coût de l'investissement. Cette « externalité temporelle » peut elle-même, être accompagnée d'externalités structurelles surtout à l'intérieur d'un « cluster¹⁶ » de technologies.

Le succès de cette qualification du progrès technique a, bien sûr, entraîné de nombreuses analyses sur ses propriétés. Une première critique a été formulée (SUE WING 2006)¹⁷ sur la non convexité des ensembles de production obéissant à l'équation précédente avec les conséquences habituelles, multiplicité des équilibres, instabilité etc. Cette multiplicité des équilibres incite à donner des informations complémentaires pour choisir parmi les différents scénarios cohérents avec l'optimisation (FINON D. 2004).

¹⁶ Cluster : technologies interdépendantes du point de vue des coûts et de leurs capacités de production.

¹⁷ qui propose une analyse critique des modèles fondés sur les courbes d'apprentissage.

Mais les critiques plus fondamentales ont été adressées à cette méthode sur le plan des conséquences économiques. La première tient à la chronologie des mises en œuvre des politiques énergétiques et en particulier celles liées au changement climatique.

Le problème d'identification récurrent dans toutes les recherches économétriques sur la production, est avivé par la brièveté des séries statistiques disponibles sur les nouvelles technologies de l'énergie. On peut se rapporter à la présentation de ces questions par ISOARD et SORIA (2001).

Telles sont les principales difficultés de ces représentations en terme d'expérience ; il n'en demeure pas moins vrai que ce type d'endogénéisation du progrès technique a quand même permis d'insérer dans les modèles de l'énergie des données technologiques précieuses, mais différentes des données des modèles *top down*. Comment réconcilier les deux approches qui apportent chacune leur part de vérité dans l'analyse.

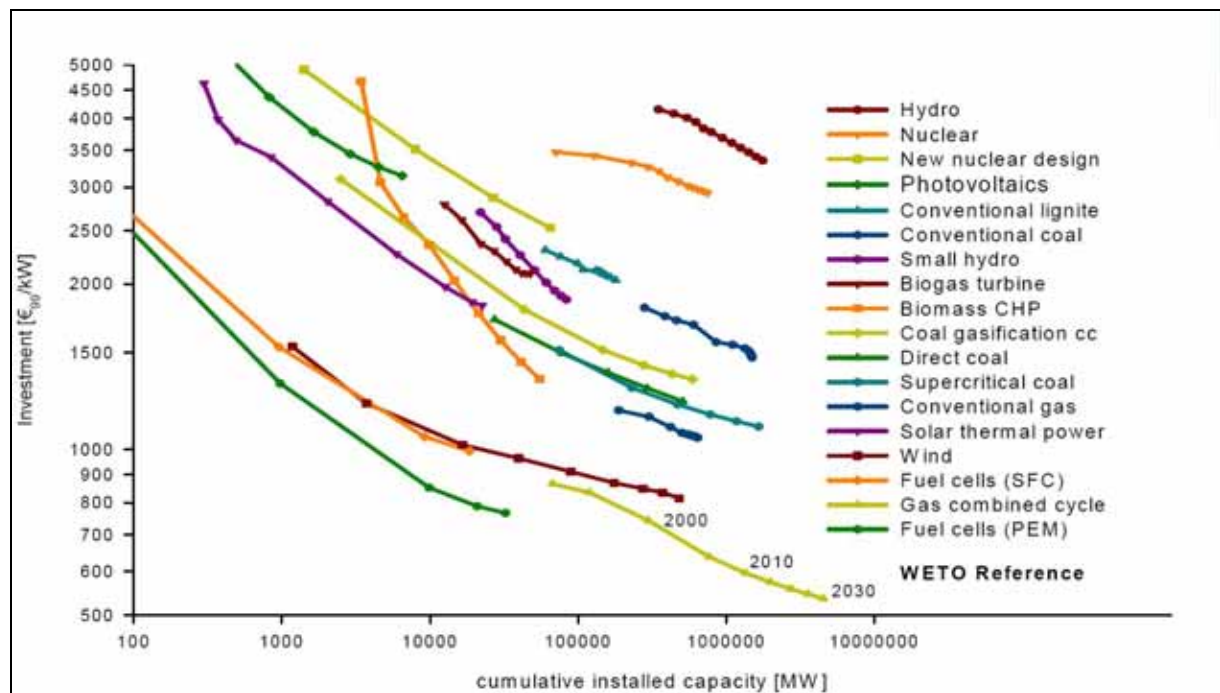


Figure 4: fonction d'expérience du modèle POLES

La réconciliation des deux approches.

Toutes les remarques déjà mentionnées sur les difficultés de rapprochement entre les modèles *top down* et *bottom up* sont applicables ici, et la prise en compte du progrès technique endogène fait évoquer deux problèmes supplémentaires : la cohérence des deux approches et l'évolution par technologie parfois radicale du progrès technique de l'ingénieur. Le problème de cohérence évoqué ici découle de l'endogénéisation *top down*, presque exclusivement reliée à la variable connaissance et notamment à la R&D ; alors que les approches technologiques sont fondées sur l'expérience, ce qui rend les résultats des politiques fondées sur la R&D incohérents.

Une façon de réconcilier les deux approches est de reprendre la proposition de KOUVARITAKIS et alii. (2000), pour le modèle POLES, d'insérer dans l'endogénéisation des progrès technologiques à la fois une variable connaissance fondée sur un stock de R&D, et des courbes d'apprentissage ; bien que, à l'époque cette suggestion n'ait pas été faite pour la mise en cohérence des deux approches, elle a été reprise pour mettre en cohérence le modèle *top down* NEMESIS avec son module technologique Energie-Environnement.

Même si les critiques de non convexité des approches fondées sur les courbes d'expérience, sont renforcées par la prise en compte de cette variable complémentaire, un minimum de cohérence est réintroduit dans le dialogue entre les modèles et cela permet d'élargir le champ des évaluations à tout un ensemble de politiques fondées sur la R&D et surtout d'éviter de faire remonter dans les modèles macro économiques des évolutions de progrès technique « gratuites ». L'étape ultérieure va consister à améliorer la variable de « connaissance » des modèles technologiques en tenant compte des externalités notamment au sein de « cluster technologiques », en élargissant ces familles et à appréhender le rôle du capital humain.

Mais l'aspect le plus important de l'écart entre les deux visions tient à ce que l'approche *top down* s'appuie sur des fonctions de production ou des fonctions de coûts le plus souvent substituables et continues, c'est-à-dire pouvant varier par incrément avec un progrès technique qui même s'il est « endogénéisé », demeure tout de même très « virtuel » et peu incarné dans des représentations technologiques parlantes. A l'opposé les modèles *bottom up* partent des technologies existantes bien que parfois chiffrée avec plus ou moins de précision et de technologies à venir qui sont jusqu'à un certain point identifiées.

La réconciliation dans le cas où les technologies sont identifiées va devoir s'atteler à une bonne calibration des paramètres de pénétration des technologies qui vont permettre de rendre cohérents l'influence de la R&D macro et les prix des autres facteurs avec le rythme d'insertion des nouvelles technologies identifiées. Ce type de réconciliation a été parfois réalisé sur des cas d'espèces mais doit être totalement automatisé dans le cadre d'une interface cohérente.

Une difficulté pour l'approche *top down*, tient à la prise en compte des technologies radicales « *back stop* », peu conciliables avec la continuité des fonctions de production ; ces technologies imposent un changement de fonction de production ; celui-ci présente deux difficultés. D'abord la date d'introduction de ces technologies peut dépendre d'informations (sur l'état de la recherche) qui ne sont pas calculées par le modèle ; pour ces raisons on peut parler de progrès technique « semi-endogène », SUE WING (2006). Une autre difficulté tient à l'instabilité que risque d'introduire dans les modèles des modèles « d'aiguillage » puisque les conditions économiques vont faire adopter de façon instantanée ces techniques très supérieures : aussi doivent être posées des conditions de diffusion ou de substitution imparfaites qui renforceront la caractère semi-endogène du progrès technique. L'approche technologique sera également tributaire de ces informations exogènes sur l'arrivée et la diffusion de ces *back-top* technologies.

Enfin la grande incertitude sur ces modèles, compte tenu de leur horizon d'utilisation qui va souvent au-delà de 50 ans, provient de l'arrivée de technologies non encore inventées ; les tendances longues de la relation R&D, productivité mises en évidence par les techniques économétriques sont-elles susceptibles de nous aider dans ces projections à long terme ? Rien n'est moins sûr, surtout si l'on garde présent à l'esprit le phénomène des technologies radicales ; par conséquent les évolutions vont être décrites en fonction des dires d'experts et la grande incertitude qu'affecte ces « prévisions » oblige à la réalisation de plusieurs scénarios de prospective technologique relativement contrastés ; là également, aussi bien dans l'approche technologique, que dans l'approche macro, le progrès technique deviendra une variable largement exogène.

3-DES OPPORTUNITES ET DES RISQUES

Tous les travaux d'amélioration de la prise en compte du progrès technique, que nous venons d'évoquer, pourront permettre de réaliser de nouveaux travaux de simulation, c'est-à-dire de faire de nouvelles évaluations de politiques déjà évaluées et d'évaluer de nouvelles politiques énergétiques fondées sur l'économie de la connaissance. Nous allons ici présenter de tels exercices réalisés avec GEM E3, même si dans la version utilisée, le progrès technique

endogénéisé sur une variable connaissance ne comporte pas toutes les caractères souhaités dans la section précédente.

Mais toutes les améliorations envisagées vont avoir pour conséquences de « consommer » plus de statistiques, d'alourdir les modèles, de nécessiter plus de puissance de calcul et donc de les rendre plus opaques c'est-à-dire de risquer de compromettre leur acceptabilité sociale. Il convient donc de resituer les projets d'amélioration dans les contextes de contraintes statistiques, de simulations et surtout d'acceptabilité de la modélisation.

Nous examinerons donc en 3.1 les résultats de travaux menés avec GEM E3 et en 3.2 les risques liés aux contraintes.

3.1- L'APPROFONDISSEMENT DES MODELES PERMET DE NOUVELLES EVALUATIONS

En fait, ce que nous voulons montrer ici, c'est la mesure dans laquelle l'évolution intensive des modèles, c'est-à-dire l'approfondissement des mécanismes, guidé par la théorie, permet d'affiner les évaluations des politiques économiques et d'étendre le champ de ces évaluations à de nouvelles politiques en prenant l'exemple de l'endogénéisation du progrès technique dans GEM E3 (cf. FOUGEYROLLAS et alii (2005)). Nous aurions pu également démontrer l'intérêt de l'extension des modèles, à travers différents sujets tels que les renouvelables, la séquestration du carbone, la biomasse etc. Nous nous limitons pour des raisons de temps à l'approfondissement en envisageant successivement les nouvelles évaluations, puis à l'évaluation de nouvelles politiques

3.1.1-LES NOUVELLES EVALUATIONS

Afin de demeurer optimiste, nous présentons ici des évaluations conduites à partir de modèles de progrès technique endogène s'appuyant sur des phénomènes de *crowding-in* énergétiques comme dans l'approche de BUONANNO et alii (2003): la hausse du prix de l'énergie induit une R&D qui n'évince pas la R&D et l'innovation sur les autres facteurs de production. Nous nous plaçons dans le cadre des objectifs de KYOTO pour l'Europe et présentons des simulations conduites avec le modèle GEM E3.

Le progrès technique est neutre dans cette version, puisqu'une seule variable de connaissance est calculée par secteur d'activité ; cette variable est un stock qui, comme dans les formulations présentées précédemment, résulte de l'investissement en R&D de la firme du secteur, des externalités inter temporelles, des externalités provenant d'autres secteurs, des laboratoires publics et de l'étranger ; la décision d'investir en R&D vient d'une maximisation de la valeur de la firme ; elle dépend donc essentiellement des prix des facteurs de production. L'augmentation du prix du CO², et donc de l'énergie, induit un progrès technique qui augmente la productivité des facteurs et cela tend à alléger le coût des politiques. Diverses politiques ont été testées et ont été comparées aux évaluations menées avec progrès technique exogène : taxe sans redistribution, taxe redistribuée par allègement de cotisations sociales et permis d'émissions négociables à titre gratuit. Dans tous les cas, les évaluations sont plus favorables (coûts moindres en PIB et emploi) lorsque le progrès technique est endogène:

- L'écart des résultats des simulations entre progrès technique exogène et progrès technique endogène est d'autant plus élevé que les prélèvements sont importants sur l'entreprise (taxe non redistribuée) ;
- Dans le scénario taxe redistribuée sous la forme de cotisations sociales, le progrès technique endogène augmente le double dividende, emploi/environnement, et bien-

être¹⁸/environnement; en revanche, l'écart est moins important qu'en l'absence de recyclage ; cela tient à ce que globalement les entreprises sont bénéficiaires de la redistribution, et donc ont moins besoin de réagir en termes de R&D ;

- Lorsque l'on compare les résultats du progrès technique neutre, avec ceux obtenus avec une version du modèle avec progrès technique biaisé « *energy-saving* » différenciant les variables connaissance, il apparaît que les derniers sont plutôt meilleurs.

	2010		2020	
	Exo	Endo	Exo	Endo
PIB	-0.25%	-0.25%	-0.47%	-0.23%
Investissement privé	-0.27%	-0.27%	-0.53%	-0.51%
Investissement en R&D	0.00%	3.48%	0.00%	3.07%
Consommation Privée	-2.07%	-2.08%	-2.68%	-2.48%
Exportations	1.31%	1.33%	1.16%	1.51%
Importations	-1.35%	-1.36%	-1.71%	-1.59%
Emploi	-207.48	-193.36	-437.33	-233.07

% d'ecart au compte central sauf emploi en millier

Tableau 1: Taxe sans recyclage (source: modèle GEM-E3)

Les deux premiers résultats (tableau 1 et 2) montrent que l'élargissement de la stratégie des entreprises aux décisions de R&D marque une amélioration : le coût des dépenses de R&D complémentaires est contrebalancé par les gains de productivité et cela n'est pas choquant de penser que l'élargissement des comportements possibles permet de « reculer » avec profit cette contrainte environnementale. En revanche, la troisième propriété a un sens plus fort dans la mesure où elle énonce qu'il n'y a pas de *crowding out* de la R&D énergie sur les autres facteurs de recherche, ou qu'en tout cas celui-ci est insuffisant pour nuire à la compétitivité et à l'emploi ; cela tient aux spécifications des élasticités de substitution de la fonction de production, aux élasticités volume/prix de la demande, ainsi que celles du stock de connaissances dans la variation de la production. Le stock de connaissances a été calculé à partir de matrices de flux technologiques (externalités) de JOHNSON (2002) et les élasticités ont été calibrées pour décrire la croissance passée.

	2010		2020	
	Exo	Endo	Exo	Endo
PIB	-0.04%	-0.05%	-0.14%	-0.07%
Investissement privé	-0.04%	-0.05%	-0.08%	-0.09%
Investissement en R&D	0.00%	1.06%	0.00%	0.63%
Consommation Privée	0.06%	0.04%	0.10%	0.16%

¹⁸ Il s'agit du bien être économique ; en fait le dividende emploi n'a pas de signification puisque le chômage est volontaire

Exportations	-0.78%	-0.80%	-1.06%	-0.95%
Importations	-1.10%	-1.11%	-1.43%	-1.39%
Emploi	1025.96	1031.96	1634.35	1663.94

% d'ecart au compte central sauf emploi en millier

Tableau 2: Taxe recyclée par une baisse des CSE (source: Modèle GEM-E3)

3.1.2-DES EVALUATIONS DE NOUVELLES POLITIQUES

L'endogénéisation du progrès technique dans les modèles permet d'élargir le champ de l'évaluation à toutes les politiques fondées sur l'accroissement des connaissances et plus spécifiquement celles de la R&D. Ainsi ont été évaluées, toujours avec le modèle GEM E3, des politiques de lutte contre le réchauffement climatique dans lesquelles les prélèvements de la contrainte carbone, taxe ou permis d'émission négociables aux enchères, ont été redistribués par deux canaux : l'aide à la R&D et l'allègement de cotisations sociales payées par les entreprises. L'aide à la R&D a été fixée à 30% de l'effort spontané ce qui est déjà très important et le solde sert à alléger les cotisations sociales, l'ampleur des prélèvements excluait toute redistribution sur la seule R&D. Les résultats présentés dans le tableau 3 sont favorables à la redistribution sous la forme d'aide à la R&D ; celle-ci agissant comme une diminution des prix de la R&D, augmente de façon très significative la dépense de R&D et donc la compétitivité, la croissance et l'emploi. On retrouve les ordres de grandeur des liens entre R&D et performance économique observée dans d'autres exercices menés avec d'autres modèles (cf. NEMESIS, WORLD SCAN). Dans ces exercices, les effets positifs de la redistribution sur les cotisations sociales indiquent que la fiscalité qui frappe le travail est trop élevée, et que les aides à la R&D devraient être plus importantes en raison notamment des externalités qui augmentent la productivité sociale de ce facteur.

	2010		2020	
	Exo	Endo	Exo	Endo
PIB	-0.07%	0.16%	0.89%	1.70%
Investissement privé	-0.01%	0.01%	0.13%	0.30%
Investissement en R&D	17.50%	31.53%	27.68%	24.24%
Consommation Privée	-0.13%	0.03%	0.65%	1.32%
Exportations	-0.35%	-0.27%	0.77%	1.87%
Importations	-0.54%	-1.04%	-0.80%	-0.51%
Emploi	315.7	1 138.68	2020.3	3161.27

% d'ecart au compte central sauf emploi en millier

Tableau 3: Taxe recyclée par une subvention à la R&D et une baisse des CSE (Source: Modèle GEM-E3)

3.2-LES RISQUES

Ils sont donc de deux ordres : les risques techniques liés aux statistiques disponibles, aux algorithmes de calcul et les risques d'acceptabilité par une communauté qui comprend des acteurs très hétérogènes, allant des scientifiques jusqu'aux décideurs de l'entreprise ou des administrations, avec un monde politique et des partenaires sociaux (syndicats, associations, ONG etc.)

3.2.1- LES RISQUES TECHNIQUES

De la contrainte de calcul à la contrainte statistique

Il y a un peu plus de 20 ans la taille des modèles était plus réduite qu'aujourd'hui et le temps de résolution beaucoup plus long¹⁹. Il est inutile d'insister ici sur les progrès de l'informatique et des logiciels de résolution, si ce n'est pour dire que cette évolution a entraîné une modification de la contrainte limitant les travaux de modélisation, d'informatique naguère, elle est devenue aujourd'hui statistique. Nous n'insisterons donc pas ici sur les questions liées à l'évolution des logiciels, sauf pour dire qu'en général les modélisateurs ont le choix entre un logiciel très utilisé, par exemple GAMS pour les modèles d'optimisation ou d'équilibre général ou un logiciel plus spécifique pour les modélisations économétriques. C'est le cas par exemple des modèles E3ME ou NEMESIS qui ont utilisé des logiciels plus adaptés mais moins répandus. Notons qu'aujourd'hui les besoins se font sentir pour élaborer des logiciels performants de classement, d'extractions et de présentation des variables de sortie qui vont simplifier la tâche des utilisateurs pour présenter les résultats de leurs travaux. De ce point de vue l'élaboration du logiciel ASPEN en sortie de POLES représente un acquis intéressant. Cette question va trouver une résonance particulière, lorsque nous évoquerons les problèmes d'acceptabilité des modèles. Enfin, il faut ajouter que les dialogues entre modèles technologiques et macro sectoriels ainsi que l'extension des modèles vers le climat, l'agriculture, la forêt ou l'utilisation de l'espace vont peut-être entraîner un développement accru de l'analyse des interfaces et des couplages entre modèles.

Les grandes difficultés et les grandes interrogations proviennent aujourd'hui de l'appareil statistique disponible pour la modélisation énergétique ; trois questions viennent spontanément à l'esprit : les données économiques, les données technologiques et enfin la réconciliation entre les deux origines.

Sur les données économiques on peut être plus ou moins exigeant selon que le modèle est calibré ou estimé ; dans ce dernier cas il est nécessaire de disposer de séries temporelles à périodicité rapprochée ; dans l'autre cas la calibration des paramètres d'échelle nécessite moins d'observations : mais les élasticités de fonctions de production ou de consommation doivent avoir été estimées préalablement à la construction du modèle et donc à partir de bases de données également relativement complètes du point de vue de la périodicité. Mentionnons que les bases de données de l'O.S.C.E. ont été modifiées, qu'elles ont changé de méthode et que l'absence, pour l'instant, de rétroprojections longues complique la tâche des modélisateurs.

Mais ce qui semble être le chantier primordial dans ce domaine, c'est de donner une mesure à tous les concepts qui ont révolutionné les théories de la croissance et du progrès technique. Tout d'abord, et d'un point de vue concret, nous trouvons les mesures des facteurs de la production et de leur productivité, ainsi que les conséquences de l'introduction des nouvelles technologies de l'information et de la communication ; sur ces points les travaux du réseau coordonné par TIMMER et alii. (2007) dans le cadre du programme européen EU KLEMS semblent apporter des avancées méthodologiques intéressantes, débouchant sur des mesures plus fiables. Sur le changement technique, il existe encore de nombreuses questions non résolues comme d'abord celle de l'incorporation exhaustive des effets qualité dans les volumes, comme l'avait souligné aux U.S.A. la commission sénatoriale BOSKIN (1995) qui concluait à un insuffisant report de la qualité dans les comptes nationaux, ce qui entraîne une diminution des volumes et une augmentation des prix. Les efforts les plus importants doivent porter sur les variables de l'induction du changement technique, c'est-à-dire sur la variable de connaissance qui est la résultante des efforts de R&D et des « externalités » provenant d'autres entreprises secteurs ou pays, sur la mesure des externalités elle-même, qui évolue actuellement avec le développement

¹⁹ Un modèle comme NEMESIS qui comportait environ 1500 équations par pays européen nécessitait plusieurs heures de résolution pour 6 pays européens et 10 ans. NEMESIS requiert aujourd'hui pour un total de 150000 équations requiert une demi-heure pour 29 pays et pour 20 ans.

de l'utilisation des brevets et sur la mesure du capital humain encore appréhendée par des données frustes sur le nombre d'années d'études ou le niveau de diplôme.

Dans le domaine des données de l'énergie, le premier grand « chantier » doit être la mise en cohérence de toutes les informations technologiques avec les données macro-sectorielles de la comptabilité nationale, et, de ce point de vue, il est important que soient débattues et codifiées les méthodes de mise en cohérence. La deuxième question a trait à l'établissement de la courbe d'expérience sur les nouvelles technologies qui, par définition, n'a pas de fondements statistiques historiques. Enfin, les données de R&D propres à l'énergie sont très lacunaires or, elles sont essentielles pour bien appréhender le phénomène de l'induction du progrès technique biaisé qui augmente la productivité de l'énergie ; une solution qui commence à se développer par l'utilisation des bases de données de brevets dans l'énergie comme variable approchée de l'effort de R&D dans ce domaine cf. POPP (2002).

3.2.2-L'ACCEPTABILITE DE LA MODELISATION ECONOMIQUE

C'est probablement l'écueil le plus redoutable de la modélisation énergétique qui est confrontée à plusieurs parties prenantes. L'ensemble des acteurs du scénario de cette confrontation va des théoriciens qui doivent valider les mécanismes des modèles, jusqu'aux utilisateurs des travaux de prospective et d'évaluation qui, d'ailleurs, recouvrent différents acteurs, comme les décideurs de l'entreprise ou des administrations publiques, les politiques membres d'assemblées, de partis, ou d'association sans oublier les « officiers scientifiques » qui vont jouer un rôle essentiel, parce qu'assurant le lien entre les modélisateurs et les décideurs.

Une première question sur l'acceptabilité de la modélisation porte sur sa « validité scientifique », en d'autres termes, est-on sûr que les acquis les plus récents des théories ou des informations statistiques sont inclus, dans la mesure du possible, dans les instruments ? Si le financement des modèles fait l'objet de demandes de subventions devant les instances communautaires ou nationales, une validation est opérée par un collège de scientifiques qui statuent, en toute indépendance, sur l'aspect scientifique du projet, ce qui donne des garanties minimales. Il n'en demeure pas moins que plusieurs difficultés demeurent. Tout d'abord la pratique de la modélisation au confluent de la théorie économique, des statistiques, des données technologiques sur l'énergie, des algorithmes de simulation et surtout devant répondre parfois à des commandes en temps limité, oblige à des compromis. La deuxième difficulté tient à ce que l'accès à des revues scientifiques généralistes n'est pas courant pour plusieurs raisons ; la vérification des simulations n'est d'abord pas aisée pour un « référent » ; ensuite, la communauté scientifique généraliste n'est pas intéressée, pour la simple raison que celle-ci n'aura jamais à utiliser des modèles et que la méthodologie de la modélisation est de ce point de vue très spécifique ; enfin les citations sur les travaux de modélisation ne seront pas dans ces revues très abondantes quand on les compare aux citations d'articles théoriques dont la méthodologie peut être récupérée dans d'autres contributions scientifiques. Ajoutons que, l'ampleur des travaux de modélisation et leur caractère très analytique, nuit à la capacité de publication et de dissémination des équipes du moins dans des revues académiques. Enfin, la vision d'une macro économie très agrégée en termes par exemple de modèle type D.G.S.E²⁰. s'est répandue dans la théorie dominante : la simplification, l'élégance, et l'utilisation des anticipations rationnelles en font de très bons vecteurs de l'académisme macro économique d'aujourd'hui qui plaide pour des modèles « top down » agrégés ; cela nous inciterait à un grand pessimisme sur l'avenir des modèles désagrégés si, par ailleurs, le formidable renouveau théorique constitué par l'analyse des interdépendances détaillées, des externalités et du progrès technique ne plaiderait pour l'usage de ces modèles.

²⁰ Dynamic General Stochastic Equilibrium : Modèle d'Equilibre Général Stochastique.

Par conséquent, l'acceptation de ce courant minoritaire que constitue la modélisation, par la communauté scientifique est loin d'être définitivement acquise, surtout que les nouveaux « critères d'excellence de SHANGAI » en termes de publications et de citations nuisent aux courants minoritaires, par un simple effet d'échelle. De ce point de vue, il est essentiel que la communauté des modélisateurs s'organise en véritable communauté scientifique ; ce qui implique des relations de coopération entravées aujourd'hui peut-être par un sentiment de concurrence et de rivalité.

L'acceptation des modèles par les décideurs en tout cas pour l'ensemble des acteurs du processus de décision européen semble confirmée par les travaux de ROSSETTI D. (2008): « Les études de cas des politiques européennes relatives à l'énergie (entre 1995 et 2005) ont ainsi montré qu'une grande partie de la crédibilité des initiatives de la Commission se trouvaient, *in fine*, entre les mains des modélisateurs. La plupart des documents législatifs européens préparatoires (Communication, Livre vert ou blanc, Document de travail des services et Proposition de Directive) se basent très souvent et largement sur les résultats de modélisation. Ces résultats servent - de façon économique et technique - soit à justifier une politique, soit à l'évaluer ». Cette acceptation, l'auteur la renforce en proposant une analyse coûts-avantages de la modélisation ou coûts de développement des modèles comparés à la rentabilité c'est-à-dire les économies dues à la décision de politique économique entraînée par le modèle !

Cependant, cet optimisme doit être tempéré parce que, d'abord ces performances de la modélisation dans le processus décisionnel sont imputables en bonne part au dévouement des « officiers scientifiques » ; ensuite parce que l'incertitude et la volatilité croissantes de nos économies donnent de nouveaux arguments aux adversaires de la prospective quantitative, enfin parce que l'évolution de la modélisation risque de renforcer les aspects de lourdeur, d'inertie et d'opacité.

D'ailleurs l'acceptation par d'autres communautés n'est peut-être pas aussi avancée ; s'agissant des partis politiques, des syndicats, ou des associations, le dialogue, faute de pédagogie suffisante, est parfois difficile même si leur bonne volonté ne fait pas défaut comme l'ont montré à Bruxelles des réunions organisées avec des « *stake holders* » dans le cadre de programmes de recherches communautaires. A noter tout de même que l'utilisation des travaux de modélisation par le Sénat français, a été un succès grâce aux administrateurs scientifiques.

L'attitude des chefs d'entreprises est également dépendante de cette accessibilité et de la transparence des modèles ; mais pas seulement, car le problème est plus complexe, n'étant pas en charge des politiques publiques, il est essentiel de leur démontrer l'utilité pour leur collaborateurs et pour la prise de décision de l'éclairage par les modèles, pour expliquer l'environnement de l'entreprise par des scénarios prospectifs, mais aussi pour comprendre les conséquences sur celles-là de la mise en oeuvre de politiques publiques.

En fait, un pas très important sera franchi lorsque les modélisateurs feront simultanément une pédagogie des schémas explicables mais également, et c'est peut-être ce qui est plus important, une pédagogie de ce qui, résultant d'interactions fortes entre agents très hétérogènes est du domaine de la complexité et donc non prévisible *a priori* sans simulations.

Un autre pas essentiel viendra de l'ouverture des modèles, c'est-à-dire de la possibilité d'intégrer dans les simulations des informations partielles, ou des suggestions, formulées par les partenaires sociaux, informations qui seraient remises en cohérence par la structure du modèle ; cela passe par la possibilité de rentrer des variables déjà calculées par le modèle (c'est-à-dire de transformer des variables endogènes en exogènes). Ainsi, pourraient être organisés des séminaires permettant de développer une approche participative dans un cadre de cohérence quantifié.

Tous ces progrès sont conditionnés par l'évolution des logiciels utilisés par les modèles ; certes, aujourd'hui la contrainte n'est pas informatique au sens où l'on peut résoudre dans des temps admissibles de gros modèles; mais lorsque l'on regarde le degré de perfection des logiciels utilisés dans d'autres disciplines, climat, imagerie médicale... qui peuvent résoudre jusqu'à 250 millions d'équations et qui présentent des résultats en trois dimensions sous la forme de dessins animés ! On mesure bien la distance par rapport à notre discipline et cela nous rend optimiste pour l'avenir à condition d'avoir su créer, pour la modélisation, la demande sociale suffisante... et les financements qui l'accompagnent pour financer ces lourds investissements.

Modèles d'ensemble utilisés en France :

GEM-E3	NTUA & ERASME
GEMINI	A. Bernard et M. Vielle
IMACLIM	CIREN
MARKAL	Ecole des Mines
MEDEE	ENERDATA
NEMESIS	ERASME & NTUA
POLES	LEPII
PRIMES	N.T.U.A.

CONCLUSION

Partant de la question très actuelle du progrès technique, nous avons vu combien il était important d'incorporer à la pratique des modélisateurs les acquis récents des théories, non seulement pour la valider scientifiquement, mais aussi pour en élargir le champ des utilisations.

De même, l'extension « raisonnable » des modèles, en prolongeant par la technologie la macro économie ou l'inverse, ou même en allant au-delà des strictes frontières de l'économie de l'énergie, rejoignant les modèles de climat ou l'analyse des externalités liées à l'énergie sur la santé, peut accroître considérablement la portée de ces modèles.

Mais prenons garde, l'approfondissement des mécanismes et l'extension, sont susceptibles de créer de nouvelles difficultés à la modélisation. Il peut s'agir parfois de mariages forcés de modèles, qui s'inscrivent dans des logiques de fonctionnement différentes, dont la résultante n'a pas de signification. C'est aussi, et surtout, un alourdissement des modèles, un manque de transparence et une faible réactivité qui nuisent à leur acceptation.

La grande question qui se pose donc, est celle du compromis entre approfondissement et extension d'un côté, et taille des modèles d'un autre côté. Même si une certaine macro économie académique a tranché sur la taille en imposant des modèles très agrégés, en revanche, les acquis récents de l'économie structurelle, en insistant sur l'hétérogénéité des agents et sur leurs interactions étendues aux connaissances, nous commandent un minimum de détail pour les travaux de modélisation.

Il faut donc persuader les « parties prenantes » que l'économie est du domaine de la complexité et que tout n'est peut-être pas explicable ; les circonstances actuelles peuvent nous y aider ; mais elles peuvent aussi détourner l'attention des problèmes structurels et en définitive amener un certain discrédit, qui serait néfaste, au moment où la modélisation doit réaliser un saut technologique nécessitant de lourds investissements.

BIBLIOGRAPHIE

Aghion P. and Howitt P., 1992. "A Model of Growth through Creative Destruction," *Econometrica*, Econometric Society, vol. 60(2), pp. 323-51.

Aghion P. and Howitt P., 1998. Endogenous growth theory, MIT Press, Cambridge MA.

Alberth S. and Hope C., 2007. "Climate modelling with endogenous technical change: Stochastic learning and optimal greenhouse gas abatement in the PAGE2002 model", *Energy Policy*, Vol. 35(3), pp. 1795-1807

Arrow K.J., 1962. "The economic implications of learning by doing", *Review of Economic Studies* Vol. XXIX, pp. 155-173.

Böhringer C., 1998. "The Synthesis of Bottom-Up and Top-Down in Energy Policy Modelling", *Energy Economics*, Vol. 20(3), pp. 233-248.

Boskin M. (Chair), Dulberger E.R., Gordon R.J., Griliches Z. and Jorgenson D., 1996. "The Boskin Commission, Toward a More Accurate Measure of the Cost of Living", Final Report to the Senate Finance Committee from the Advisory Commission To Study The Consumer Price Index.

Breard D., Fougeyrollas A., Le Mouel P., Lemiale L. and Zagame P., 2006. "Macro-economic consequences of European research policy: Prospects of the Nemesis model in the year 2030", *Research Policy*, Vol. 35(7), pp. 910-924.

Buonanno P., Carraro C. and Galeotti M., 2003. "Endogenous induced technical change and the costs of Kyoto", *Resource and Energy Economics*, Vol. 25, pp. 11-34.

Capros P., Georgakopoulos T. and Mantzos L., 1997. "Economic and energy system implications of European CO2 mitigation strategy: A model based analysis", National Technical University of Athens.

Capros P. and Vouyouka E.L., 2000. "Technology evolution and energy modelling: overview of research and findings", *International Journal of Global Energy Issues*, Vol. 14(1), pp. 1-32.

Cohen W., Levinthal D., 1989. „Innovation and Learning: The Two Faces of R&D", *The Economic Journal*, Vol. 99 (397), pp. 569-96.

Edmonds, J.A., Wise M.A., and MacCracken C.N., 1994. "Advanced Energy Technologies and Climate Change: An Analysis Using the Global Change Assessment Model (GCAM)". Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington.

European Commission, 1995. "GEM-E3 Computable General Equilibrium Model for Studying Economy-energy-Environment Interaction", OPEC, Luxembourg, 1995.

European Commission, 1991. "DG XII, Cost-effectiveness analysis of CO2 reduction options", Brussels.

European Commission, 1991. "DG XII, Increase of taxes of energy as a way to reduce CO2 emissions: problems and accompanying measures", Brussels.

European Commission, 1993. "HERMES: Harmonized Econometric Research for Modelling Economic Systems", Publication No. Eur 14359 En of the Commission of the European Communities, North-Holland Publishing Co.

Faubry E., Moncomble J-E., Vidal de la Blache O. et Zagamé P., 1984. « Le modèle Hermès-France », *Economie et prévision*, Vol. 66(5).

Finon D., 1979. "Scope and limitations of formalized optimization of a national energy system – The EFOM model", *Energy Models for the European Community – An Energy Policy Special*, ed. Strub A., published by IPC Science and Technology Press, pp. 3-15.

Finon D., 2003. "Prospective énergétique et modélisation, identification de pistes de progression méthodologique", Document rédigé pour le Comité français de l'énergie de Juin 2003.

Finon D., 2004. "Prospective énergétique et modélisation de long terme: Les voies de progression méthodologique », *Revue de l'Énergie*, Vol. 553, pp. 3-15.

Foray D., 2004. *The economics of knowledge*, MIT Press, Cambridge.

Fougeyrollas A., Le Mouel P. and Zagamé P., 2001. "Semi Endogenous Growth in a Computable General Equilibrium Approach", *Computing in Economics and Finance*, Vol. 232, Society for Computational Economics.

Giraud P.N., 2002. « Effet de serre : modélisation économique et décision publique », Commissariat Général au Plan, mars 2002.

Gnesotto N. and Grevi G., 2006. "The New Global Puzzle – What World for the EU in 2025 ?", EU Institute for Security Studies.

Goulder L.H. and Schneider S.H., 1999. "Induced technological change and the attractiveness of CO₂ abatement policies", *Resource and Energy Economics*, Vol. 21(3-4), pp. 211-253.

Goulder L.H., 2004. "Induced Technological Change and Climate Policy", Pew Center on Global Climate Change Report, Washington DC.

Greenberger M., Crenson M.A. and Crissey B.L., 1976. "Models in the Policy Process: Public Decision Making in the Computer Era." New York: Russell Sage Foundation: distributed by Basic Books.

Griffith R., Redding S. et Van Reenen J., 2003. "R&D and Absorptive Capacity: Theory and Empirical Evidence," *Scandinavian Journal of Economics*, Blackwell Publishing, vol. 105(1), pp. 99-118.

Griliches Z., 1979. "Issues in Assessing the Contribution of Research and Development to Productivity Growth", *Bell Journal of Economics*, The RAND Corporation, vol. 10(1), pp. 92-116.

Griliches Z., 1992. "The Search for R&D Spillovers," *Scandinavian Journal of Economics*, Blackwell Publishing, Vol. 94(0), pp. S29-47.

Grubb M., 1993. "Policy modelling for climate change: The missing models," *Energy Policy*, vol. 21(3), pp. 203-208.

Guilmot J.F, McGlue D., Valette P., Waeterloos C., 1986. "Energie 2000", European Commission DG XIII, Cambridge University Press, Cambridge UK.

International Energy Agency, 2000. "Experience Curves for Energy Technology Policy", Publisher: OECD - Organisation for Economic Co-operation and Development, pp. I-132(133).

Isoard S. and Soria A., 2001. “Technical change dynamics: evidence from the emerging renewable energy technologies”, *Energy Economics*, Vol. 23, pp. 619–636.

IPCC, 2001. “Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)”, Cambridge University Press.

Jones, C., 1995. “R&D-Based Models of Economic Growth”, *Journal of Political Economy*, University of Chicago Press, Vol. 103(4), pp. 759-84.

Johnson D., 2002. “The OECD Technology Concordance (OTC): Patents by Industry of Manufacture and Sector of Use”, *Technology and Industry Working Papers*, OECD Directorate for Science, Technology and Industry

Kepler J.H., Bourbonnais R. and Girod J., 2006. *The Econometrics of Energy Systems*, eds. Palgrave Macmillan, London, pp. 350.

Kouvaritakis N., Soria A., Isoard A. and Thonet C., 2000. “Endogenous learning in world post-Kyoto scenarios: application of the POLES model under adaptive expectations”, *International Journal of Global Energy Issues*, Vol. 14, pp. 222–248.

Lapillonne, B. and Chateau, B., 1981. “The Medee models for long term energy demand forecasting Socio-Economic Planning Sciences”. Vol. 15(2) pp. 53-58.

Löschel A., 2002. “Technological change in economic models of environmental policy: a survey”, *Ecological Economics*, Vol. 43, pp. 105–126.

Löschel A., 2004. “Technologies, energy consumption and environmental policy in energy–economy models”, *International Journal of Energy Technology and Policy*, Vol. 2(3), pp. 250–261.

Loulou R., 2005. “The slow convergence of Top-Down and Bottom-Up Energy Models”, International Colloquium for the 25th anniversary of GERAD, May 11 2005, Montréal.

Mairesse J. et Mohnen P. 1999. « Recherche-développement, externalités et productivité : un survol de la littérature économétrique », *Les Cahiers de l'Innovation*, Vol. 99019, CNRS.

Manne A.S, Richels R.G. and Weyant J.P., 1979. “Energy Policy Modelling: A Survey”, *Operations Research*, Vol. 27(1),

Manne A.S., Richels R.G. and Mendelsohn R., 1995. “MERGE: a model for evaluating regional and global effects of GHG reduction policies”, *Energy Policy*, Vol. 23(1), pp. 17–34.

Manne A.S., 1980. “The Use and Role of Models: Long-Term Energy Projections for the USA”, in R. Kavanagh (ed.), *Energy Systems Analysis*, D. Reidel, Dordrecht: Holland, pp. 64-79.

Mansfield E., 1977. “Social and private rates of return from industrial innovations”, *Quarterly Journal of Economics*, Vol 91(2), pp. 221–240.

McDonald A. and Schrattenholzer L., 2001. “Learning rates for energy technologies”, *Energy Policy*, Vol. 29, pp. 255–261.

McFarland J.R., Reilly J.M. and Herzog H.J., 2004. “Representing energy technologies in top-down economic models using bottom-up information”, *Energy Economics* Vol. 26, pp. 685–707.

National Technical University of Athens, 2000. “The Economic Effects of EU-wide Industry-Level Emission Trading to Reduce Greenhouse Gasses-Results from PRIMES model”, Study for the European commission (DG Environment).

Nordhaus, W.D., 2002. "Modelling induced innovation in climate-change policy", In: A. Grubler, N. Nakicenovic and W.D. Nordhaus, Editors, *Technological Change and the Environment*, Resources for the Future, Washington, DC, pp. 182–209.

Patel H.M., 2000. "Very long term energy modelling (VLEEM)", Final Report, European Commission, Brussels.

Perälä, M.J., 2008. "Increasing returns in the aggregate: fact or fiction ?", *Journal of Economic Studies*, Vol. 35(2), pp. 112-153.

Pilavachi P.A., Dalamaga Th., Rossetti di Valdalbero D., Guilmo J.-F., 2008. "Ex-post evaluation of European energy models", *Journal: Energy Policy*, Vol. 36(5), pp. 1726-1735.

Pillu H. and Koleda G., 2008. "Induced Innovation and International Technological Opportunity in the Field of Energy: Evidence from World Patent Citations", 3rd Conference on Energy Economics and Technology, Friday, 11 April, 2008, Dresden.

Popp D., 2001. "The effect of new technology on energy consumption", *Resource and Energy Economics*, Vol. 23(3), pp. 215-239.

Popp D., 2002. "Induced Innovation and Energy Prices", *American Economic Review*, Vol. 92(1), pp. 160-180.

Popp D., 2004. "ENTICE: Endogenous Technological Change in the DICE Model of Global Warming", *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 48(1), pp. 742-768.

Romer P., 1986. "Increasing Returns and Long-run Growth," *Journal of Political Economy*, University of Chicago Press, Vol. 94(5), pp. 1002-37.

Romer P., 1990. "Endogenous Technological Change", *Journal of Political Economy*, University of Chicago Press, Vol. 98(5), pp. S71-102.

Rossetti Di Valdalbero D., 2004. "MODELLING IN ENERGY ECONOMICS AND POLICY", 6. Th. International Association of ENERGY ECONOMICS European Conference. 2 September 2004, ZURICH.

Rossetti Di Valdalbero D., 2008. "La recherche économique et le processus décisionnel européen: le cas des politiques relatives à l'énergie", These soutenue le 18 fevrier 2008, sous la direction de Chevalier J.M., EDOCIF, IRI-CGEMP.

Simon H. A., 1955. "A Behavioral Model of Rational Choice", *Quarterly Journal of Economics*, Vol. 69, pp. 99-118.

Sue Wing I., 2006. "Representing induced technological change in models for climate policy analysis" *Energy Economics*, Vol. 28 (5-6), pp. 539-562.

Sue Wing I., 2008. "The synthesis of bottom-up and top-down approaches to climate policy modelling: Electric power technology detail in a social accounting framework" *Energy Economics*, Vol. 30(2), pp. 547-573.

Timmer M., O'Mahony M. and Van Ark B., 2007. "The EU KLEMS Growth and Productivity Accounts: An Overview", University of Groningen & University of Birmingham, March 2007.

Vandenbussche, J., Aghion, P., and Meghir, C., 2006. "Growth, Distance to Frontier and Composition of Human Capital", *Journal of Economic Growth*, Vol. 11(2), pp. 97-127.

Van Der Zwaan B.C.C., Gerlagh R., Klaassen G. and Schrattenholzer L., 2002. “Endogenous technological change in climate change modelling”, *Energy Economics*, Vol. 24, pp. 1–19