UNIVERSITÉ PARIS-EST

ÉCOLE DOCTORALE *« VILLE ET ENVIRONNEMENT »*

Thèse de doctorat

Sciences Economiques

Olivier SASSI

L'IMPACT DU CHANGEMENT TECHNIQUE ENDOGENE SUR LES POLITIQUES CLIMATIQUES

Thèse dirigée par Jean-Charles Hourcade

Soutenue le 21 novembre 2008

Jury :

Michel Colombier (rapporteur)
Patrick Criqui (rapporteur)
Sylviane Gastaldo (examinateur)
Pierre-Noël Giraud (président)
Jean-Charles Hourcade (directeur de thèse)

Remerciements

C’est en premier lieu à mon directeur de thèse, Jean-Charles Hourcade, que s’adressent mes remerciements. Son encadrement, son dynamisme, ses encouragements et la justesse de ses intuitions m’ont permis de mener à bien de ce travail.
Michel Colombier et Patrick Criqui ont accepté de s’intéresser à cette thèse et d’en être les rapporteurs, qu’ils soient ici remerciés. Que soient aussi remerciés Sylviane Gastaldo et Pierre-Noel Giraud qui ont bien voulu faire partie de mon jury.
La plupart des travaux qui sont présentés dans cette thèse sont fondés sur le développement et l’utilisation du modèle IMACLIM-R. Sans les collègues qui constituent, de près ou de loin, l’équipe de développement du modèle, je n’aurai jamais pu obtenir les résultats qui sont présentés ici. Je tiens donc à remercier ici ceux qui ont participé tour à tour à la relecture de cette thèse ou bien à l’amélioration du modèle : Chrisophe Cassen, Renaud Crassous, Frédéric Ghersi, Céline Guivarch, Meriem Hamdi-Cherif, Nadia Henry, Sandrine Mathy, Antoine Saglio, Rodica Sandu-Loisel, Henri Waisman. Cette équipe constitue en outre un environnement scientifique particulièrement stimulant qui a largement contribué à la réalisation de ces travaux.
Je tiens encore à remercier tous les membres du CIRED, tant chercheurs que personnels administratifs, qui contribuent à donner à ce lieu un caractère unique et si agréable.

Finalement, je voudrais remercier ma compagne, mes parents, ma sœur, mon frère et mes proches amis pour tout le soutien qu’ils m’ont apporté dans ce travail de longue haleine.

Table des matières

Chapitre 1 : Les modèles du changement climatique et l'induction du changement technique : Un état des lieux

1 LES ECONOMISTES ET LE PROCESSUS D'INNOVATION : ENTRE CHANGEMENT TECHNIQUE AUTONOME ET PROGRES TECHNIQUE INDUIT 21

2 LE CHANGEMENT TECHNIQUE DANS LES MODELES INTEGRES APPLIQUES AU CHANGEMENT CLIMATIQUE 25

2.1 REPRESENTATIONS EXPLICITES *VS* REPRESENTATIONS SUBROGEES DES TECHNIQUES 25
2.1.1 L'approche technico-économique, un langage d'ingénieur 26
2.1.2 Les techniques dans les modèles macroéconomiques 27
2.2 LES REPRESENTATIONS EXOGENES DU PROGRES TECHNIQUE 30
2.3 VERS UNE REPRESENTATION ENDOGENE DU CHANGEMENT TECHNIQUE 32
2.3.1 Changement technique induit : les choix de modélisation 33
2.3.2 Implications des choix de modélisation pour l'évaluation des politiques climatiques 39

3 POUR UNE VISION ELARGIE DE L'INDUCTION AU CHANGEMENT STRUCTUREL 43

3.1 LES LIMITES DE L'ART 43
3.2 PROBLEMES POSES ET CAHIER DES CHARGES POUR UNE NOUVELLE ARCHITECTURE DE MODELISATION 45
3.2.1 Etudier la transition entre changement technique induit et changement structurel induit 46
3.2.2 Prendre en compte l'interaction entre trajectoires technologiques de long terme et frictions de court terme 48
3.2.3 Explorer l'impact des politiques climatiques sur la croissance de long terme 50

CONCLUSION 51

BIBLIOGRAPHIE 52

Chapitre 2 : L'architecture du modèle IMACLIM-R

1 CHOIX METHODOLOGIQUES ET STRUCTURE DU MODELE 61

1.1 UNE VISION DUALE DE L'ECONOMIE POUR FACILITER LE DIALOGUE ENTRE LES INGENIEURS ET LES ECONOMISTES 61
1.2 UN MOTEUR DE CROISSANCE QUI PERMET DES ECARTS TRANSITOIRES ENTRE LA CROISSANCE POTENTIELLE ET LA CROISSANCE REELLE 65

2 DONNÉES 67

3 EQUILIBRE STATIQUE 70

3.1 DEMANDE DES MENAGES EN BIENS, SERVICES ET ENERGIE 70
3.1.1 Revenu et épargne 70
3.1.2 Fonction d'utilité 71
3.1.3 Programme de maximisation 72

3.2 CONTRAINTES DE PRODUCTION ET COURBES D'OFFRE ... 73
3.3 ADMINISTRATIONS ... 75
3.4 MARCHE DU TRAVAIL ... 76
3.5 FLUX DE CAPITAUX ET INVESTISSEMENTS ... 77
3.5.1 Allocation régionale et internationale de l'épargne ... 77
3.5.2 Achat de biens d'équipement ... 78
3.6 MARCHES DES BIENS ET COMMERCE INTERNATIONAL ... 79
3.7 CONTRAINTES D'EQUILIBRE SUR LES FLUX PHYSIQUES ... 80
3.8 CHOIX D'UN NUMERAIRE ... 81
3.9 ÉMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE ET TAXE CARBONE ... 81
3.9.1 Comptabilisation des émissions ... 81
3.9.2 Evolution des coefficients d'émissions ... 81
3.9.3 Taxe carbone ... 82

4 LIENS DYNAMIQUES : MOTEUR DE CROISSANCE ET CHANGEMENT TECHNIQUE ... 82

4.1 LE MOTEUR DE CROISSANCE : DEMOGRAPHIE, PRODUCTIVITE ET ACCUMULATION DE CAPITAL ... 83
4.1.1 Evolution démographique ... 83
4.1.2 Productivité du travail ... 86
4.1.3 Formation de l'investissement et accumulation du capital ... 90
4.2 CHANGEMENT STRUCTUREL ... 92

CONCLUSION ... 94

BIBLIOGRAPHIE ... 97

Chapitre 3 : Intégration des informations sectorielles dans le cadre de l'équilibre général : Défis et méthodes

1 PRODUCTION D'ENERGIE PRIMAIRE : DISPONIBILITE, PRODUCTION ET MISE SUR LE MARCHE DES RESSOURCES PETROLIERES ... 103

1.1 UNE EXPLICATION DE LA COURBE DE HUBBERT ... 105
1.1.1 Des découvertes dépendantes de deux mécanismes antagonistes ... 105
1.1.2 De la découverte à la production ... 106
1.1.3 Relier le modèle de Hubbert aux signaux économiques : l'apport du modèle LOPEX ... 108
1.2 INTRODUCTION DES COURBES DU HUBBERT DANS LE MODELE IMACLIM-R ... 109
1.2.1 Désagrégation des réserves de pétrole ... 109
1.2.2 Courbes de Hubbert et capacités de production ... 111
1.2.3 Comportement des producteurs ... 112
1.2.4 La formation des prix du pétrole ... 113

2 TRAITEMENT DES AUTRES COMBUSTIBLES FOSSILES ... 114

2.1 PRODUCTION DE GAZ NATUREL ET FORMATION DES PRIX ... 114
2.2 PRODUCTION DE CHARBON ET FORMATION DES PRIX ... 114

3 TRANSFORMATION ENERGETIQUE : OFFRE ALTERNATIVE DE CARBURANTS LIQUIDES 115

3.1 BIOCARBURANTS ... 116
3.1.1 Part de marché et contraintes d'offre ... 116
3.1.2 Formation du prix et structure de coût ... 117
3.2 CARBURANTS SYNTHETIQUES ... 118

4 GENERATION D'ELECTRICITE : PRISE EN COMPTE DES CONTRAINTES DE LA COURBE DE CHARGE ... 119

4.1 DES TECHNOLOGIES DE PRODUCTION EXPLICITES DETAILLEES EN GENERATION DE CAPITAL ... 120

4.2 LA CONTRAINTE PHYSIQUE ET TEMPORELLE DE LA COURBE DE CHARGE 123
4.3 PLANIFICATION OPTIMALE DES INVESTISSEMENTS EN ANTICIPATION IMPARFAITE 126
4.3.1 Projection de la demande et anticipation du prix des combustibles 126
4.3.2 Détermination, en amont, des investissements dans les capacités de production renouvelables non hydrauliques 127
4.3.3 Investissement prioritaire dans l'hydroélectrique 129
4.3.4 Parc de production conventionnel 130
4.3.5 Composition de l'investissement courant : minimisation de la distance entre parc de production optimal anticipé et parc installé 133
4.4 DU PARC DE PRODUCTION INSTALLE AU COUT MOYEN DE PRODUCTION 134

5 DEMANDES D'ENERGIE FINALE 137

5.1 CONSOMMATIONS INTERMEDIAIRES D'ENERGIE DES SECTEURS PRODUCTIFS 137
5.2 USAGES RESIDENTIELS 140
5.3 TRANSPORTS 143
5.3.1 Véhicules particuliers : stock et intensité énergétique 143
5.3.2 Autres moyens de transport : capacités et consommations d'énergie 146
5.3.3 Evolution de la demande de transport par les autres secteurs 148

6 LE PROGRES TECHNIQUE 148

CONCLUSION 149

BIBLIOGRAPHIE 151

Chapitre 4 : Une trajectoire de référence : leçons d'une modélisation hybride avec progrès technique endogène

1 UN RAPIDE RETOUR SUR L'EXERCICE DE MODELISATION SRES 157

2 QUEL CONTENU MATERIEL DE LA CROISSANCE DANS UN SCENARIO « CENTRAL » ? 163

2.1 UNE VISION AGREGEE DE LA RICHESSE MONDIALE 163
2.2 UNE TRADUCTION EN TERMES DE CONTENU MATERIEL ET DE CHANGEMENT STRUCTUREL 167

3 CONSOMMATION D'ENERGIE ET PRIX RELATIFS 174

3.1 LA STRUCTURE DE LA DEMANDE FINALE CHANGE AU COURS DU TEMPS 174
3.2 CONTRAINTES SUR LA MISE A DISPOSITION DES RESSOURCES PETROLIERES, DE LEURS SUBSTITUTS ET PRIX DES ENERGIES FOSSILES 177
3.3 L'EVOLUTION DU SYSTEME ELECTRIQUE 183

4 NIVEAU ET COMPOSITION DE LA TRAJECTOIRE D'EMISSION 185

4.1 DES EMISSIONS EN FORTE CROISSANCE 185
4.2 UNE INTERPRETATION EN TERMES D'IDENTITE DE KAYA 188

BIBLIOGRAPHIE 193

Chapitre 5 : Tests paramétriques et robustesse du scénario de référence : à la recherche d'effets systémiques

1 VARIANTES TESTEES 197

2 LES CONDITIONS D'OBTENTION D'UN SCENARIO DE REFERENCE A « BASSES » EMISSIONS 199

3 IDENTIFICATION DE MECANISMES « TIRANT » LA TRAJECTOIRE D'EMISSION VERS LE HAUT 203

3.1 UN DEVELOPPEMENT SOBRE EN ENERGIE RALENTIT LE RYTHME DES GAINS D'EFFICACITE ENERGETIQUE 204
3.2 EFFET DE « MASQUE » DU PRIX DE L'ENERGIE ET RISQUE DE « *LOCK-IN* » DANS DES TRAJECTOIRES INTENSIVES EN TRANSPORT 206
3.3 EFFETS REBOND ET REDUCTIONS D'INTENSITE ENERGETIQUE 209
3.3.1 Les différents types d'effet rebond 209
3.3.2 Les effets rebond sectoriels directs 210
3.3.3 Les effets rebond macroéconomiques 212

CONCLUSION 213

BIBLIOGRAPHIE 215

Chapitre 6 : Changement structurel induit et scénarios de stabilisation

1 QUELQUES PRECISIONS METHODOLOGIQUES 220

1.1 DEFINITION DES OBJECTIFS DE STABILISATION 220
1.2 QUELLES SPECIFICATIONS POUR LE PROGRES TECHNIQUE ? 221
1.3 TRAJECTOIRES DE REDUCTION DES EMISSIONS ET SIGNAL DE DECARBONISATION 222

2 UN SCENARIO DE STABILISATION A 450 PPMV AVEC CHANGEMENT TECHNIQUE INDUIT DANS LE SECTEUR ENERGETIQUE 223

2.1 VALEUR DU CARBONE : DES PRIX SUPERIEURS A CEUX OBTENUS DANS LA LITTERATURE 223
2.2 DEVELOPPEMENT ENERGETIQUE SOUS CONTRAINTE CARBONE 225

3 CHANGEMENT TECHNIQUE ENDOGENE ET COUT DE STABILISATION 230

3.1 L'INDUCTION DU CHANGEMENT TECHNIQUE PERMET DE REDUIRE LES COUTS 230
3.1.1 Pourquoi l'induction du changement technique réduit le niveau de la taxe ? 234
3.1.2 L'induction du changement technique réduit les dépenses énergétiques de décarbonisation 238
3.2 COUTS MACROECONOMIQUES : UNE MAUVAISE SURPRISE LIEE A LA REPRESENTATION ENDOGENE DE LA CROISSANCE ? 240

4 CHANGEMENT STRUCTUREL INDUIT ET POLITIQUES CLIMATIQUES 245

4.1 AU-DELA DE LA TAXE CARBONE 246
4.1.1 Un signal à l'efficacité marginale décroissante 246
4.1.2 Le secteur des transports comme un point de blocage à la décarbonisation 247
4.2 POUR UNE VISION ELARGIE DU CHANGEMENT STRUCTUREL 250
4.2.1 Stabilisation climatique et politiques d'infrastructures 250
4.2.2 Multiplication des signaux et coût de la stabilisation 252

CONCLUSION 258

BIBLIOGRAPHIE 260

***Conclusion*.....261**

***Bibliographie*.....267**

Introduction générale

La communauté scientifique s'accorde aujourd'hui largement sur le fait, qu'en l'absence d'une action spécifique, les émissions mondiales de gaz à effet de serre continueront de croître pendant encore au moins quelques décennies. L'accumulation de ces gaz à effet de serre dans l'atmosphère terrestre provoquera des modifications nombreuses du système climatique (IPCC, 2007). L'évaluation des conséquences économiques futures du changement climatique, si elle reste teintée d'incertitudes, fait apparaître des dommages potentiels à même d'entraîner des pertes de bien-être considérables (Stern, 2006).

Il découle de cette prise de conscience une montée en puissance de la question de la lutte contre le changement climatique aussi bien dans les programmes de recherches académiques que dans les agendas politiques nationaux ou internationaux. Dans ces arènes, les débats ont fortement évolué, ces dernières années, autour de la forme possible de l'action politique visant à réduire les émissions anthropiques de gaz à effet de serre. Quel que soit le cadre d'action considéré (taxe internationale sur le carbone, échanges de permis d'émissions…) il est largement admis que la réduction des émissions de gaz à effet de serre requise pour limiter l'ampleur du changement climatique à venir, nécessitera le développement et la diffusion à grande échelle de technologies améliorant l'efficacité de la production des services énergétiques ou bien permettant d'en réduire le contenu en carbone.

Le progrès technologique a historiquement permis un accès généralisé à de nombreux services énergétiques tels la mobilité, le chauffage ou encore l'éclairage *via* la diffusion de nouvelles technologies moins chères et plus efficaces. Ce développement est toutefois associé à l'apparition d'externalités négatives associées aux filières de production de ces services, au nombre desquelles se trouvent les émissions de gaz à effet de serre responsables du changement climatique.

La question du changement technique se retrouve ainsi au centre des préoccupations concernant les politiques de réduction des émissions, à la fois parce qu'il est présenté comme un moyen de les réduire, mais aussi parce qu'il peut prendre une direction contraire et engendrer une évolution du système énergétique conduisant à leur emballement. Par exemple, des perspectives existent pour augmenter significativement la part des combustibles fossiles dans l'approvisionnement mondial en énergie primaire *via* le développement de filières de liquéfaction du charbon ou de l'exploitation des gisements de schistes bitumineux pour palier les contraintes pesant sur la mise à disposition des ressources pétrolières.

Face à l'objectif de réduire les émissions de manière à éviter une ampleur du changement climatique qui est considérée comme « dangereuse », les pays les plus industrialisés ont à accomplir des efforts de réduction très importants, tandis que les économies émergentes doivent emprunter une trajectoire de développement différente de celle qui a été observée jusqu'à maintenant pour atteindre un pic mondial des émissions de gaz à effet de serre dans les quinze prochaines années.

La volonté politique affichée de modifier le rythme et la direction du changement technique dans un sens « économe en carbone » (*cf.* Abraham (2004), par exemple) pose au monde académique un double défi : Il s'agit d'abord de comprendre l'origine du progrès technique, le fonctionnement du processus d'innovation et sa contribution au fonctionnement des économies afin de déterminer dans quelle mesure il peut être orienté ou accéléré par des politiques climatiques. Il s'agit ensuite de mieux représenter le changement technique à l'intérieur des modèles de prospective destinés à

évaluer le coût des politiques climatiques et également à éclairer la décision politique quant à la forme que doit prendre le signal de décarbonisation pour être le plus efficace.

Ce dernier point a été un des chantiers de modélisation majeurs de ces dernières années. En pratique, le débat s'est concentré sur la nécessité d'adopter une représentation endogène du progrès technique et d'abandonner les traditionnelles représentations exogènes dans lesquelles les politiques climatiques ne peuvent infléchir le cours des évolutions technologiques. Nous retrouvons ainsi, dans le quatrième rapport du GIEC, la reconnaissance claire des efforts entrepris dans ce sens par les équipes de modélisation :

> "A major development since the TAR has been the treatment of technological change in many models as endogeneous, and therefore potentially induced by climate policy, compared to previous assumptions of exogenous technological change that is unaffected by climate policies. "
> (Barker et *al.*, 2007, section 11.5.1)

Historiquement, les modèles qui utilisaient une représentation exogène du progrès technique ont été accusés de surévaluer le coût des politiques climatiques, en même temps qu'ils sous-estimaient les effets vertueux associés à la mise en place précoce d'une action de réduction des émissions qui provoquerait dans la réalité une orientation du progrès technique en faveur des technologies les plus économes en carbone. Et en quelque sorte, la prise en compte, dans les modèles, de la possible induction du progrès technique par les politiques climatiques a fait l'effet d'une « bonne nouvelle » pour l'évaluation des coûts d'évitement du changement climatique.

Au point de départ de notre thèse se trouve une intuition visant à modérer l'enthousiasme qui découle des premiers résultats publiés au milieu des années 1990 (*cf.* Hourcade et *al.*, 2001). En effet, dans la quasi-totalité des cas, l'endogénéisation du changement technique dans les modèles est limitée au seul secteur énergétique. Ceci revient à considérer que les politiques climatiques, quels que soient les objectifs de réduction des émissions visés, n'auront aucun effet sur la direction et la vitesse du progrès dans les autres secteurs de l'économie. De plus, tout ce débat reste limité à la représentation des phénomènes d'induction liés au seul progrès technique et néglige les possibles inductions entrecroisées qui existent entre les changements techniques, les modes de consommation des ménages et les dynamiques d'aménagement de l'espace.

Notre thèse se propose donc de revisiter le débat « autonome *versus* induit », pour ce qui concerne le coût des politiques climatiques, tout d'abord en élargissant le cadre de l'induction du changement technique aux autres secteurs de l'économie puis en effectuant une première tentative d'aller au-delà du concept d'induction du changement technique et de raisonner en termes d'induction du changement structurel. Nous allons ainsi évaluer comment sont modifiées les conclusions habituellement tirées des modèles lorsque l'on adopte une conception élargie de l'induction qui, par simple souci de cohérence, suppose l'adoption d'un modèle de croissance endogène. Nous explorerons aussi comment ce cadre de modélisation donne la possibilité d'évaluer l'efficacité de politiques climatiques qui utilisent des instruments mixtes pour transmettre aux marchés le signal de décarbonisation.

Dans le chapitre 1, nous effectuons une revue synthétique des modes de représentation du progrès technique dans les modèles de prospective économique utilisés pour l'évaluation des politiques climatiques. Ce travail, nous permet de souligner l'écart existant entre les fondements théoriques du concept de progrès technique endogène et la transposition de ce concept dans les

modèles. Notre diagnostic sur les travaux effectués est constitué de trois sujets d'insatisfaction qui deviennent le cahier des charges de notre travail pour une nouvelle architecture de modélisation :

- Le concept d'induction est trop souvent limité au progrès technique dans le secteur énergétique alors que les politiques climatiques sont susceptibles d'induire d'importants changements structurels.
- L'induction du progrès technique par les politiques climatiques se déploie dans des trajectoires de croissance économique sans heurts, ce qui évacue toutes les interactions possibles entre les frictions de court terme et les orientations du changement technique.
- L'impact des politiques climatiques sur les déterminants de la croissance économique n'est que rarement envisagé. Ceci interdit d'évaluer l'impact de ces politiques sur le niveau et le contenu de la croissance à long terme.

C'est en partant de ce cahier des charges que les chapitres 2 et 3 présentent le modèle IMACLIM-R qui a été développé pour combler une partie des insatisfactions formulées dans le chapitre précédent. Il s'agit d'un modèle d'équilibre général récursif qui simule, sur la période 2001-2100, l'évolution de l'économie mondiale détaillée en 12 régions et 12 secteurs. Son l'architecture a la particularité de consister en une résolution successive d'équilibres statiques des économies entre lesquels des modules sectoriels informent les évolutions des différents coefficients techniques. Ce choix de modélisation permet de garantir une cohérence forte entre les trajectoires macroéconomiques et les dynamiques technologiques tout en facilitant l'incorporation d'informations sectorielles spécifiques dans les scénarios simulés. Le chapitre 2 présente les justifications théoriques du modèle ainsi que la structure de l'équilibre statique. Le chapitre 3 détaille les modules dynamiques sectoriels, qui permettent l'intégration des informations technico-économiques dans le cadre de l'équilibre général. Tout au long de ces deux chapitres, nous détaillons spécifiquement les stratégies que nous avons adoptées pour modéliser l'induction du changement technique et du changement structurel par les politiques climatiques.

Nous entrons dans la présentation de nos résultats avec les chapitres 4 et 5. Ces deux chapitres sont dédiés à l'analyse du scénario de référence que nous obtenons avec la structure de modélisation IMACLIM-R. Ce scénario a la particularité de présenter une bifurcation vers une trajectoire très intensive en carbone, malgré un choix d'hypothèses médianes pour la croissance, le progrès technique et le contenu matériel du développement. Ces résultats alertent sur les risques liés au « laissez faire » et prolongent les études empiriques récentes (Raupach et *al.*, 2007) qui soulignent que le niveau actuel des émissions est au-dessus de l'intervalle fourni par les modèles lors de l'exercice SRES. Le chapitre 4 est dédié à la description détaillée de ce scénario tandis que le chapitre 5 identifie les mécanismes déterminants pour l'obtention de tels niveaux d'émissions. Nous démontrons ainsi que ces résultats procèdent moins d'une combinaison particulière d'hypothèses que de la réalisation d'interactions endogènes au fonctionnement du modèle qui visent à « attirer » les trajectoires d'émissions vers le haut. Nous présentons ces mécanismes spécifiques qui ne sont généralement pas pris en compte dans les autres structures de modélisation.

Le chapitre 6 explore les conséquences, en termes de politiques climatiques d'une prise en compte plus ou moins étendue des phénomènes d'induction des changements techniques et structurels. En améliorant le réalisme de la représentation des phénomènes d'induction dans le

modèle IMACLIM-R, nous verrons comment l'appréciation des politiques climatiques se modifie lorsque l'on passe d'une induction du changement technique limitée au périmètre habituel du secteur énergétique, à une induction qui concerne le progrès technique dans tous les secteurs de l'économie, puis à une induction des comportements des agents par les politiques d'infrastructures de transport. L'important est ici de comprendre la nature des mécanismes d'induction jusqu'ici négligés et en quoi ils peuvent modifier sensiblement la conception des politiques climatiques.

Une grande partie des travaux qui constituent cette thèse est fondées sur le développement et l'utilisation d'IMACLIM-R. Si l'essentiel de notre travail au cours de cette thèse a été de construire ce modèle, tout ce qui a été obtenu ici n'aurait pu l'être sans le concours de toute une équipe. A notre arrivée au CIRED, en 2004, le modèle existait déjà, dans une version simplifiée, à la suite du travail de Renaud Crassous qui s'était appuyé sur les premiers travaux de Vincent Gitz et Philippe Ambrosi avec le modèle *EGPEN*. Nous avons ensuite continué le développement du modèle, Renaud Crassous et moi-même, en formant un binôme resserré qui s'est étendu, au fil des nouvelles arrivées, pour constituer aujourd'hui une équipe d'une dizaine de personnes. Ainsi, au cours de son développement le modèle IMACLIM-R a largement bénéficié des contributions de Vincent Gitz, Céline Guivarch, Meriem Hamdi-Cherif, Sandrine Mathy et Henri Waisman.
Du fait de la très grande proximité de nos travaux avec ceux de Renaud Crassous, le lecteur pourra remarquer dans cette thèse « un air de famille » avec la thèse de doctorat de M. Crassous. En particulier, les chapitres 2 et 3 de présentation du modèle ont été rédigés en commun, au cours de son développement.

La construction d'un outil tel qu'IMACLIM-R ne peut effectivement pas s'envisager sans un important travail en équipe, et cette dynamique continue de se poursuivre et de s'amplifier. Du fait de son originalité et de sa capacité à être utilisé comme un outil intégrateur des expertises sectorielles dans un cadre cohérent d'équilibre général, ce modèle connaît aujourd'hui une reconnaissance croissante. Celle-ci se traduit sur le plan académique par deux publications dans des revues à comité de lecture (Crassous et *al.*, 2006 ; Sassi et *al.*, 2007) et plusieurs communications dans des colloques internationaux (Sassi et *al.*, 2005 ; Crassous et *al.*, 2007 ; Sassi et *al.*, 2007 ; Waisman et *al.*, 2007). Du côté de l'expertise et de la recherche appliquée, le modèle est régulièrement utilisé pour produire des scénarios de prospective en lien avec les problématiques énergétiques ou climatiques. Les contributions de ce modèle se retrouvent ainsi dans une publication de la Banque Mondiale (Winters et Yusuf, 2007, chapitre 5) ou bien, plus régulièrement, dans le *World Energy Outlook*, une des publications annuelles de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE, 2007, chapitre 3). De plus, le modèle est largement mobilisé pour alimenter le débat public *via* des contrats de recherches institutionnels (programmes Gestion et Impacts du Changement Climatique, scénarios pour l'Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique) ou bien à des fins privées pour des entreprises industrielles (contrats avec Electricité De France ou bien l'association Entreprises Pour l'Environnement, par exemple).

Bibliographie

Abraham, S., 2004. “The Bush administration's approach to climate change”. *Science* 30 (5684), pp. 616-617.

AIE, 2007, “World Energy Outlook”, *IEA/OECD*, Paris, France.

Barker, T., I. Bashmakov, A. Alharthi, M. Amann, L. Cifuentes, J. Drexhage, M. Duan, O. Edenhofer, B. Flannery, M. Grubb, M. Hoogwijk, F. I. Ibitoye, C. J. Jepma, W.A. Pizer, K. Yamaji, 2007, “Mitigation from a cross-sectoral perspective”. *In Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Crassous, R., Hourcade, J.-C., Sassi, O., 2006, “Endogenous Structural Change and Climate Targets. Modeling experiments with Imaclim-R.” In “Endogenous Technological Change and the Economics of Atmospheric Stabilisation.” *The Energy Journal*, Special Issue: 259-276.

Crassous, R., Sassi, O., Waisman, H., Hourcade J.-C., Criqui, P., Mima, S., Kitous, A., 2007, “Prospects for Energy-Intensive Industries under a 450 ppm CO2 constraint: lessons from an IMACLIM-POLES dialog”, *International Energy Workshop*, Stanford.

Hourcade, J.C., P.R. Shukla, 2001, “Global, regional, and national costs and ancillary benefits of mitigation”, in: B. Metz, O. Davidson, R. Swart, J. Pan (Eds.), *Climate Change 2001: Mitigation*, Cambridge University Press, Cambridge, MA, 2001.

IPCC, 2007, *Climate Change 2007: synthesis report,* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Raupach, M., Marland, G., Ciais, P., Le Quéré, C., Canadell, J., Klepper, G., Field, C., 2007, “Global and regional drivers of accelerating CO_2 emissions”, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 104 (24), pp. 10288–10293.

Sassi O., Crassous R., Hourcade J.-C., 2005, “Induced technical change in the transportation sector and induced mobility”, *International Energy Workshop*, Kyoto.

Sassi, O., Crassous, R., Hourcade, J.-C., Gitz, V., Waisman, H., Guivarch, C., 2007, “Imaclim-R: a modelling framework to simulate sustainable development pathways”, *International Journal of Global Environmental Issues* , Special Issue, In press.

Sassi, O., Guivarch, C., Crassous, R., Hourcade J.-C., Waisman, H., 2007, “Long-run Emissions Scenarios Revisited: Some Dynamics Underlying Plausible very Carbon-intensive Pathways”, *International Energy Workshop*, Stanford.

Stern, N., 2006, “The Stern review: the economics of climate change”, Cambridge University Press, Cambridge.

Waisman, H., Hourcade J.-C., Sassi, O., Crassous, R., Guivarch, C., 2007, “Investigating the Interplay between Climate Change Policies and the Strategic Behavior of Middle-East Oil Producers”, *International Energy Workshop*, Stanford.

Winters, L., A., Yusuf, S., 2007, *Dancing with Giants: China, India, and the Global Economy*, World Bank, Washington DC.

Chapitre 1

Les modèles du changement climatique et l'induction du changement technique : Un état des lieux

Table des matières

1 LES ECONOMISTES ET LE PROCESSUS D'INNOVATION : ENTRE CHANGEMENT TECHNIQUE AUTONOME ET PROGRES TECHNIQUE INDUIT 21

2 LE CHANGEMENT TECHNIQUE DANS LES MODELES INTEGRES APPLIQUES AU CHANGEMENT CLIMATIQUE 25

2.1 REPRESENTATIONS EXPLICITES *VS* REPRESENTATIONS SUBROGEES DES TECHNIQUES 25
2.1.1 L'approche technico-économique, un langage d'ingénieur 26
2.1.2 Les techniques dans les modèles macroéconomiques 27
2.2 LES REPRESENTATIONS EXOGENES DU PROGRES TECHNIQUE 30
2.3 VERS UNE REPRESENTATION ENDOGENE DU CHANGEMENT TECHNIQUE 32
2.3.1 Changement technique induit : les choix de modélisation 33
2.3.2 Implications des choix de modélisation pour l'évaluation des politiques climatiques 39

3 POUR UNE VISION ELARGIE DE L'INDUCTION AU CHANGEMENT STRUCTUREL 43

3.1 LES LIMITES DE L'ART 43
3.2 PROBLEMES POSES ET CAHIER DES CHARGES POUR UNE NOUVELLE ARCHITECTURE DE MODELISATION 45
3.2.1 Etudier la transition entre changement technique induit et changement structurel induit 46
3.2.2 Prendre en compte l'interaction entre trajectoires technologiques de long terme et frictions de court terme 48
3.2.3 Explorer l'impact des politiques climatiques sur la croissance de long terme 50

CONCLUSION 51

BIBLIOGRAPHIE 52

Poussée par l'agenda de la décision politique, la représentation du changement technique dans les modèles de l'interface économie-énergie-environnement a reçu de la part de la littérature académique une attention importante ces dernières années. Cet effort de recherche intense s'est en particulier concrétisé par la publication d'un ouvrage collectif (Grubler et *al*., 2002) et de quatre numéraux spéciaux de revues internationales à comité de lecture : *Ressource and Energy Economics*, vol. 25, 2003 ; *Energy Economics*, 2004, vol. 26 ; *Ecological Economics*, 2005, vol.54 ; *Energy Journal*, 2006.

Nous consacrons le premier chapitre de cette thèse à la revue de cette littérature qui débouche sur le constat critique qui a présidé à l'organisation de notre travail. Dans une première section, nous nous concentrons sur la compréhension théorique du processus d'innovation pour ensuite détailler, dans une deuxième section, les modes d'incorporation du changement technique induit dans les modèles. La troisième et dernière section de ce chapitre énonce les insatisfactions que nous pouvons prononcer quant à l'état des lieux de la modélisation et propose les pistes d'amélioration que nous avons explorées dans cette thèse.

1 Les économistes et le processus d'innovation : entre changement technique autonome et progrès technique induit

L'origine d'une vision induite du changement technique remonte aux travaux de Hicks (1932), qui formule l'hypothèse suivante :

> "A change in the relative prices of the factors is itself a spur to invention and to inventions of a particular kind – directed at economizing the use of a factor which has become relatively expensive."
> (Hicks, 1932 : pp. 124-125)

Cette vision du changement technique comme un processus induit par les variations des prix relatifs des facteurs de production pose plus globalement la question de l'influence sur le développement technologique, du contexte économique, c'est-à-dire à la fois des signaux de marché et des politiques publiques. Elle introduit également une distinction entre changement technique induit et autonome, autonome au sens où l'évolution technologique serait indépendante des conditions du marché.

En fait, comme le remarquent Grubb et *al.* (2002) les seules évolutions techniques que l'on peut raisonnablement tenir pour indépendantes des conditions du marché sont celles qui sont totalement déterminées par une découverte faite par un inventeur génial ou par la production de connaissances dans des organismes publics de recherche.

Or, force est de reconnaître que l'essentiel des modélisations économiques empiriques traitait encore il y a peu le changement technique comme un processus exogène, ou, pour reprendre l'expression utilisée dans la littérature en langue anglaise, un don du ciel (« *a manna from heaven* »). Cet état de fait qui peut surprendre de la part d'économistes a une origine historique précise, à savoir le rôle joué par le modèle de Solow (1956, 1957) dans la théorie de la croissance. Dans l'équation canonique (1.1), c'est bien le temps qui fait bouger la frontière de production, les prix relatifs des facteurs ne faisant que déterminer le choix d'une technique spécifique (plus ou moins intensive en travail ou en capital) au sein du panier des techniques que définit cette frontière.

$$Y = A(t) \cdot F(K, L) \qquad (1.1)$$

Lors de son discours de réception du Prix Nobel en 1988, Solow (1988) a pourtant bien souligné le fait qu'il avait choisi ce type de traitement du changement technique dans un but précis, fournir une alternative au modèle d'Harrod-Domar (*cf.* Harrod, 1939 ; Domar, 1946), et qu'il ne faut l'utiliser qu'avec précaution pour étudier d'autres problèmes. Ce modèle est cependant devenu un « standard » pour la macroéconomie et cela explique pourquoi la plupart des modèles appliqués au changement climatique ont, dans un premier temps, hérité de sa structure.

Pour Grubb et *al*. (2002), le changement technique induit se définit en opposition d'une évolution technologique indépendante des conditions de marché. Une vision autonome du changement technique tend à considérer que l'évolution des systèmes techniques est déterminée par les découvertes scientifiques au sens où l'*offre* de nouvelles technologies développées par la recherche universitaire ou publique s'impose, de l'extérieur, aux agents économiques opérant sur les marchés. Au contraire, le changement technique induit serait associé aux efforts d'innovation et de recherche appliquée effectués par les secteurs productifs (privés ou publics).

Dans la littérature en langue anglaise, les auteurs associent à l'opposition entre changement technique autonome et induit, l'image d'une évolution technologique qui serait plutôt déterminée par l'**apparition de nouvelles technologies** (*supply push*) face à une évolution technologique déterminée par les **besoins du marché** et des agents économiques (*demand pull*).

Il n'existe cependant pas de cadre théorique unifié pour décrire le processus d'innovation (Jakeman, 2004 ; Ruttan, 2002), mais il est généralement admis, de façon pragmatique, que le développement d'une nouvelle technologie s'appuie sur une connaissance scientifique et qu'elle découle d'un processus de recherche et/ou d'expérimentation. L'expérience est aussi une source de développement technologique *via* les phénomènes d'apprentissage par la pratique (*learning by doing*). Enfin, le processus d'innovation dans un secteur ou une région donnée peut profiter des avancées effectuées dans d'autres régions du monde et/ou d'autres secteurs de l'économie grâce à l'existence d'externalités technologiques positives (*spillover*). L'induction du changement technique est alors reliée à ces trois mécanismes qui composent le processus d'innovation :

a) La ***recherche et développement*** (R&D)

Même si une partie importante de l'avancée des connaissances relève de la recherche publique et que l'induction du changement technique concerne *a priori* les programmes privés de R&D, Grubb et *al*. (2002) précisent que cette première distinction doit être raffinée du fait de la part croissante du financement croisé public et privé de la recherche et aussi en raison du mode de définition même des objectifs de la recherche publique qui visent en partie à résoudre des problèmes effectivement perçus ou anticipés. Dans ce dernier cas, le changement technique issu de l'effort de recherche public peut être considéré comme partiellement induit, par des besoins du marché anticipés à plus long terme.

En fait, chez la majorité des auteurs, la théorisation du changement technique induit au travers de l'orientation des politiques de R&D se fait en référence à l'approche Schumpeterienne (Schumpeter, 1942). Celle-ci accorde un rôle clé à l'entrepreneur dans l'innovation puisque c'est lui qui la met en œuvre et qui profite ensuite des succès obtenus par un profit supplémentaire, temporairement plus élevé que la rentabilité obtenue pour les autres capitaux investis. Les agents ont donc tendance à orienter leur politique de R&D dans le but de maximiser la valeur actualisée nette de leur investissement. Ceci conduit à lier le rythme et la direction du changement technique avec les conditions observées sur les marchés *via* les

décisions prises en matière de recherche et développement. Un travail de justification empirique de l'existence d'une induction du changement technique à travers le processus de R&D se retrouve dans la littérature, souvent par le biais de régressions effectuées sur des données relatives aux dépôts de brevets. A titre d'exemple, Popp (2002) étudie les brevets déposés aux Etats-Unis de 1970 à 1994 sur un ensemble de technologies énergétiques et trouve que les prix de l'énergie ont un effet positif sur l'innovation dans ce domaine, illustrant ainsi l'existence d'un processus d'induction du changement technique provenant de variations des prix des facteurs de production. De nombreux auteurs (Azar et Dowlatabadi, 1999 ; Köhler, 2006, par exemple) soulignent cependant qu'il est très difficile de mesurer un lien quantitatif entre investissement dans la R&D et avancées technologiques. Le problème est avant tout une question de capacité de mesure. Le processus d'innovation dans un domaine précis est par essence incertain et bénéficie de nombreuses externalités positives (*spillover*) ; il est dès lors très difficile de mesurer précisément à la fois l'effort de recherche et sa production en termes d'innovation.

b) **L'apprentissage par la pratique** (***learning by doing***)

Les phénomènes d'apprentissage découlent de l'idée selon laquelle la performance des technologies augmente et leur coût décroît au fur et à mesure que les agents économiques les utilisent.

Le concept d'apprentissage par la pratique a été originalement développé dans le domaine de la psychologie et en particulier de la pédagogie. Dans le domaine technologique, Löschel (2002) attribue au Boston Consulting Group (1968) l'invention de la courbe d'expérience qui relie le coût total de production d'un produit au volume de sa production cumulée. Mais, en fait, ce concept trouve ses sources dans des études consacrées à l'industrie manufacturière. Il a été observé pour la première fois par Wright (1936) dans le domaine de la construction aéronautique aux Etats-Unis dans les années 1930 où le coût unitaire en travail dans ce secteur suivait une fonction décroissante de l'expérience, mesurée par la production cumulée.

En général, les études empiriques dans ce domaine consistent à mener des analyses statistiques de corrélation entre changement technique et production cumulée. Dans le domaine de la théorie économique, la conceptualisation du phénomène d'apprentissage par la pratique comme une des composantes du processus d'innovation remonte à Arrow (1962). Ce concept englobe à la fois les effets d'apprentissage liés à l'amélioration du processus de production, à la conception du produit, et à la réduction des dépenses associées aux intrants. De nombreuses études économétriques ont produit des courbes d'apprentissage reliant l'évolution du coût d'une technologie au volume de sa production cumulée et démontrant par là même l'existence d'une corrélation forte entre changement technique et expérience. Le processus d'apprentissage est en général supposé être exponentiel et le paramètre déterminant sa vitesse est donné par le ratio de progrès (*progres ratio*) qui correspond à la réduction du coût d'une technologie associée à un doublement de sa production cumulée. Il est souvent associé à ce paramètre, le taux d'apprentissage (*learning rate*) qui correspond au taux de réduction du coût d'une technologie associé à un doublement de sa production cumulée[1]. Dutton et Thomas (1984) étudient les résultats obtenus dans un ensemble d'environ cent publications produites sur la période 1920-

[1] Ces deux paramètres sont liés par la relation suivante : taux d'apprentissage =1 - ratio de progrès

1980 qui déterminaient des ratios de progrès dans divers secteurs industriels. Leurs résultats reflètent des valeurs comprises entre 0.55 et 1.08 avec une moyenne située à 0.8.
Nous retrouvons d'ailleurs souvent dans la littérature (Clarke, 2006 ; Köhler et *al*., 2006, par exemple) la mention de l'existence d'une règle empirique donnant une approximation des taux d'apprentissage à 20%. Cette règle, si elle est observée pour un nombre important de technologies, reste à manipuler avec précaution du fait (i) de l'existence d'un processus de diminution des taux d'apprentissage au fur et à mesure que les technologies deviennent matures, (ii) de l'existence d'asymptotes sur les coûts de production qui s'opposent à la poursuite du processus d'apprentissage (Köhler et *al.*, 2006).

c) ***Les externalités technologiques positives***

Ces externalités, liées au processus d'innovation, tissent un lien supplémentaire entre les différentes sources du changement technique, renforçant ainsi le caractère induit de celui-ci par les conditions de marché. Van Meijl et van Tongeren (1999) considèrent qu'une externalité technologique positive existe si un agent profite de gains de productivité grâce à des technologies développées par d'autres agents et pour lesquels il ne fournit pas de contrepartie financière. Dans leur revue rapide de la littérature sur l'innovation, Weyant et Olavson (1999) distinguent différents types d'externalités technologiques positives : elles peuvent apparaître à l'intérieur d'un même secteur ou entre différents secteurs de l'économie en même temps qu'elles peuvent être locales ou internationales. Ces externalités peuvent se transmettre *via* des échanges matériels (le commerce par exemple) lorsque l'innovation est incorporée dans un nouveau produit, ou immatériels (les publications scientifiques) lorsqu'il s'agit d'un transfert de connaissance. Le changement technique qui apparaît dans une entreprise, un secteur de production, un pays ou même un domaine de la connaissance peut donc, par le biais d'externalités technologiques positives, bénéficier des avancées effectuées dans une autre entreprise, secteur de production, pays ou domaine de la connaissance. Clarke (2006) souligne l'importance du phénomène d'externalité technologique dans le processus d'innovation. Du point de vue empirique, Griliches (1992) effectue une revue des études testant l'existence d'externalités positives pour la R&D. Tout en mettant en garde contre les dangers liés aux multiples difficultés d'évaluation économétrique, il conclut à une importance centrale des externalités technologiques positives dans l'activité de recherche et développement. Köhler et *al*. (2006) précisent que l'existence d'externalités technologiques positives peut conduire à surestimer les taux d'apprentissages associés à certaines technologies. Par exemple, dans le domaine énergétique les taux d'apprentissage très élevés observés pour la production des cellules photovoltaïques sont en partie à mettre sur le compte des avancées effectuées dans le domaine de l'électronique de pointe.

Une revue de la littérature sur l'innovation mène à un constat en demi-teinte pour le modélisateur. Il apparaît en effet clairement que le changement technique est au moins partiellement induit par la réaction des agents économiques aux signaux se formant sur les marchés. Cependant, l'introduction d'une représentation endogène du changement technique dans les modèles de l'interface économie-énergie-environnement se heurte à deux obstacles principaux :
La transcription des avancées obtenues par la littérature de l'innovation dans des modèles quantitatifs rencontre tout d'abord un **problème de mesure**. Si l'existence des mécanismes

d'induction du changement technique a été vérifiée à partir d'études empiriques, l'évaluation de paramètres reliant quantitativement investissements et production d'innovation reste un défi non résolu.

Ensuite, il n'existe pas de **schéma théorique synthétique** permettant de décrire l'interaction entre les différentes composantes du processus d'innovation d'une façon qui soit facilement traduisible dans les modèles. Les auteurs soulignent précisément que le processus d'innovation induite résulte de l'interaction entre les trois composantes principales que nous avons résumées ci-dessus. Au cours de l'élaboration d'une nouvelle technologie, il existe en effet des allers-retours entre ces trois composantes et le développement de l'innovation profite tour à tour de résultats obtenus suite à un effort de recherche orienté, à un phénomène d'apprentissage ou des avancées produites par d'autres agents dans d'autres domaines de la connaissance.

Ce constat en demi-teinte quant à la réalité de l'état de l'art pousse en définitive certains auteurs (Clarke, 2008) à conseiller aux modélisateurs de garder une part autonome dans le changement technique tant la réalité de l'induction est complexe à représenter.

2 Le changement technique dans les modèles intégrés appliqués au changement climatique

Malgré ces difficultés théoriques et empiriques, les modélisateurs ont produit un effort important ces dernières années pour incorporer une description endogène du changement technique dans les modèles intégrés appliqués au changement climatique. Cet effort est principalement motivé par les conséquences de ce changement d'optique de modélisation sur les conclusions tirées des modèles pour la décision politique.

Les différentes tentatives d'incorporer une description endogène du changement technique ne peuvent être présentées sans une mise en relation préalable avec la structure et le fondement théorique des modèles dans lesquels elles ont pris forme. C'est pourquoi nous ferons ici une revue synthétique des modes de représentation des systèmes techniques dans les modèles de l'interface économie-énergie-environnement.

2.1 Représentations explicites *vs* représentations subrogées des techniques

Historiquement, les modèles du changement climatique se sont développés en suivant une opposition entre des modèles macroéconomiques (modèles d'équilibre général, modèles macroéconométriques), dits **« *top-down* »** en anglais parce que les techniques, comme d'ailleurs la consommation sont représentées, à un niveau très agrégé, grâce à une « fonction de coût » ; et des modèles consacrant une approche sectorielle (modèles d'optimisation du système énergétique, modèles de simulation en équilibre partiel) dits **« *bottom-up* »** parce que la représentation des techniques s'effectue à un niveau plus détaillé et dans un langage de quantités physiques plus proche de celui de l'ingénieur. La frontière entre ces deux voies de modélisation évolue aujourd'hui du fait d'un développement sans cesse plus important des approches « **hybrides** » qui tendent à allier, dans un même modèle, des caractéristiques propres à chacune des deux familles originelles (Hourcade et *al*., 2006). Le cheminement méthodologique qui accompagne la volonté de rendre

endogène la représentation du progrès technique dans les modèles ne peut cependant pas se comprendre sans un retour aux différences entre ces deux programmes scientifiques qui incarnent, dès l'origine, des visions contrastées des mondes économiques et techniques.

2.1.1 L'approche technico-économique, un langage d'ingénieur

L'approche technico-économique ou **« bottom-up »** est fondée sur une vision de l'économie dite en équilibre partiel. Elle se focalise sur le secteur énergétique, de la production d'énergie primaire à la fourniture de services énergétiques finaux en passant par le système de transformation. Le reste de l'économie n'est représenté qu'en tant que consommateur final de ces services. La représentation du système énergétique est caractérisée par une description explicite des technologies de production, de transformation ou d'usage final de l'énergie (coûts, rendements, capacités installées). Le détail de cette représentation est variable en fonction des modèles mais peut atteindre une précision importante (il existe par exemple 280 technologies d'usages finaux de l'énergie dans AIM/EndUse, Shukla et *al.*, 2003).

Une partie de ces modèles repose sur une description du secteur énergétique selon un système linéaire proche de l'analyse d'activité ; ils visent à déterminer les choix technologiques optimaux pour répondre à un vecteur donné de demande de services énergétiques finaux *via* la minimisation du coût total du système énergétique. Entrent dans cette catégorie la grande famille des modèles MARKAL (Fishbone et *al.*, 1983) ou le modèle MESSAGE (Messner, 1997). Ces modèles sont parfois couplés à un module macroéconomique pour prendre en compte les rétroactions du secteur énergétique sur la formation de la demande de services énergétiques (MARKAL-MACRO, Manne et Wene (1992) ; MESSAGE-MACRO, Messner et Schrattenholzer (2000)).

Une autre partie de ces modèles abandonne l'objectif d'optimisation du système énergétique mais vise à décrire son évolution grâce à une simulation en général récursive. Ces modèles sont réputés être plus réalistes que ceux de la sous-famille précédente, dans la mesure où ils approchent mieux les comportements réels des agents économiques dans leurs modes de consommation d'énergie ou les choix technologiques qui y sont associés. Les modèles POLES (LEPII-EPE, 2006) ou CIMS (Jaccard et *al.*, 1996) font originalement partie de ce groupe.

Dans l'un ou dans l'autre des deux cas précédents, le changement technique est représenté par des substitutions entre des technologies identifiées à l'intérieur d'un portfolio technologique donné. Ce changement englobe, toujours *via* des technologies identifiées, tant pour la production d'énergie primaire que la transformation en énergie finale ou la conversion en énergie utile :

- des substitutions potentielles entre sources d'énergie pour la production d'un même service énergétique, par exemple la pénétration d'une motorisation électrique dans le parc des véhicules particuliers ;
- des gains d'efficacité énergétique pure, par exemple un choix de véhicules utilisant un moteur à combustion interne plus efficace.

Ces améliorations sont toujours incorporées dans des technologies et le *changement technique* apparaît lorsqu'une technologie est remplacée par une autre. Le *progrès technique* est en revanche lié à l'évolution dans le temps des caractéristiques des technologies considérées (disponibilité, coût, efficacité).

2.1.2 Les techniques dans les modèles macroéconomiques

L'approche macroéconomique ou **« *Top-down* »** est fondée sur une vision globale de l'économie, à des degrés d'agrégation très différents, pouvant aller d'un bien unique (modèle DICE (Nordhaus, 1994)) à plusieurs dizaines de secteurs productifs (par exemple 16 secteurs dans EPPA v4 (Paltsev et *al.*, 2005), 14 dans GEMINI-E3 (Bernard et Vielle, 1998), plus de 200 dans AMIGA (Hanson, 1999)). Cette représentation a l'avantage de prendre en compte les rétroactions qui existent entre les différents secteurs de l'économie à travers des marchés pour les biens échangés ou les facteurs de productions. En revanche, et contrairement aux modèles « *bottom-up* », cette cohérence macroéconomique s'obtient au prix d'une représentation très stylisée des technologies et du secteur énergétique.

Dans un modèle « *top-down* », l'activité économique est, en effet, décrite à chaque instant t par une fonction de production (Equ. (1.2)), à l'échelle globale ou de chaque secteur, qui relie la production Y aux quantités de facteurs de production utilisées K (capital), L (travail), E (énergie) et M (biens intermédiaires).

$$Y_t = f_t(K_t, L_t, E_t, M_t) \tag{1.2}$$

Quelle que soit sa forme mathématique, une telle fonction est censée représenter l'ensemble des combinaisons possibles de facteurs de production permettant de produire une unité du bien considéré. A un instant donné, les technologies existantes dans chaque secteur ou dans l'économie tout entière sont ainsi décrites à travers les combinaisons possibles de facteurs dans la portion de l'espace qui est délimitée par la frontière de production. Avec une quantité donnée de facteurs de production, cette frontière définit le niveau de production maximale qui peut être atteint en les combinant. Il est donc impossible d'atteindre un niveau de production se situant au-delà de cette frontière. Une combinaison de facteurs qui se situe dans la portion de l'espace intérieur à la frontière se révèle inefficace dans la mesure où des technologies existent pour produire la même quantité de bien avec une utilisation de facteurs moins coûteuse. En l'absence de progrès technique, il est bien sûr impossible de déplacer cette frontière. La forme mathématique et le paramétrage des fonctions de production sont des moyens de décrire différentes possibilités de substitutions entre les facteurs qui sont toujours continues et sont l'équivalent des substitutions discrètes entre technologies identifiées dans les modèles « *bottom-up* ». L'utilisation d'une telle fonction pour décrire l'ensemble des possibilités techniques d'une économie découle directement de l'approche adoptée par Solow (1956, 1957) :

> « *It occurred to me very early, as a natural-born macroeconomist, that even if technology itself is not so very flexible for each single good at a given time, aggregate factor intensity must be more variable because the economy can choose to focus on capital-intensive or labor-intensive or land-intensive goods.* »
> (in Solow, 1988, p. 308)

On doit ici insister sur un point souvent passé sous silence, à savoir l'abus d'interprétation auquel a historiquement donné lieu cette forme de description des choix techniques. En effet, l'essor exceptionnel qu'ont connu les modèles d'équilibre général calculable depuis la fin des années soixante dix s'est appuyé sur une généralisation des fonctions de production « *à la Solow* ». Or,

dans le même temps l'interprétation technique de ces fonctions de production était réfutée par Solow lui-même dans son discours de prix Nobel :

> « *this 'wrinkle' is acceptable only at an aggregate level (for specific purposes) and implies to be cautious about the interpretation of the macroeconomic productions functions as referring to a specific technical content.* »
> (in Solow, 1988, p. 313).

Cette extension de l'approche Solow au-delà de son domaine de pertinence est en pratique une des sources majeures des difficultés de dialogue entre économistes et ingénieurs.
En fonction des modèles, la complexité de ces fonctions est très variable. Ainsi, dans le modèle compact DICE (Nordhaus, 1994), l'économie est résumée par une fonction Cobb-Douglas :

$$Y_t = \Omega_t \cdot A_t \cdot K_t^{\gamma} \cdot L_t^{1-\gamma} \tag{1.3}$$

dans laquelle les paramètres Ω(t) et A(t) correspondent respectivement à l'effet du changement climatique sur la productivité et à la productivité générale des facteurs.
En revanche, dans les modèles d'équilibre général multisectoriels, les fonctions de production peuvent être beaucoup plus complexes. Les modélisateurs ont très largement adopté les fonctions CES (*Constant Elasticity of Substitution*) imbriquées, comme le montre la Figure 1, relative au modèle EPPA (Paltsev et *al.*, 2005). Dans l'arbre de cette figure, on distingue :

- les nœuds « perpendiculaires » comme à l'étage supérieur, symbolisant une fonction de type Leontief, autrement dit une combinaison de facteurs *non-substituables* – dans ce cas précis ce sont les biens agriculture, transport, services, etc. et l'agrégat capital-travail-énergie (KLE), en proportions fixes pour chaque unité produite ;

- les portions « triangulaires » comme sous l'agrégat KLE, représentant une fonction CES (avec une élasticité de substitution σ), autrement dit une combinaison de facteurs *substituables*, ici l'agrégat énergie et la valeur ajoutée.

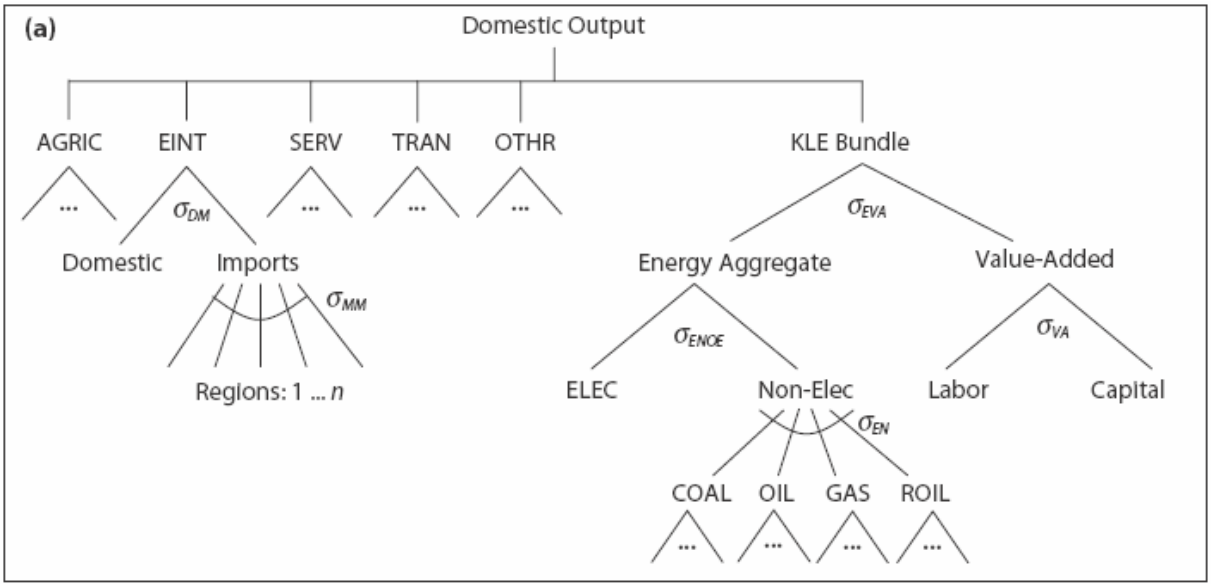


Figure 1 : Structure de production des secteurs Industries et Services dans EPPA 4 (Paltsev. et *al.* 2005)

Cette complexification est une première façon d'introduire un réalisme technologique. Mais elle ne répond pas à deux limites de fond de l'approche :

La première est qu'en statique, cette représentation agrégée d'un *continuum* de technologies que les agents peuvent utiliser est incorporée dans des fonctions qui sont justifiées au plan théorique seulement au **voisinage d'un point d'équilibre**. Elle repose en effet sur l'utilisation du lemme de Shephard, qui est une application du théorème de l'enveloppe et qui suppose qu'au point équilibre les rapports des productivités marginales des facteurs sont égaux aux rapports des prix de ces mêmes facteurs. Le caractère héroïque de cette hypothèse fut dénoncé par Solow lui-même :

« […] total-factor-productivity calculations require not only that market prices can serve as a rough-and-ready approximation of marginal products, but that aggregation does not hopelessly distort these relationships […] over-interpretation is the endemic econometric vice. »
(in Solow, 1988).

Ensuite, reste le simple fait qu'une approximation faite au voisinage d'un point d'équilibre n'est plus tenable dès lors qu'on examine des **écarts importants par rapport à cet équilibre de référence** (très concrètement des prix des énergies multipliés par deux ou trois) ; le risque est, par exemple en raisonnant avec des élasticités de substitution constantes, de violer les lois de la thermodynamique dès lors qu'on examine des situations de transformation profonde des prix relatifs des facteurs. Un problème du même type se pose bien sûr lorsqu'on représente non plus les choix techniques sur une frontière de production, mais l'évolution même de cette frontière sous l'impact du progrès technique.

C'est pour pallier ces risques d'irréalisme technologique des projections qu'une partie de la communauté des modélisateurs « *top-down* » a entrepris des efforts d'hybridation des modèles avec des informations technologiques sectorielles. Ils ont en particulier conduit à la possibilité d'améliorer le réalisme des fonctions de production en permettant d'y représenter des technologies identifiées (McFarland et *al.*, 2004).

2.2 Les représentations exogènes du progrès technique

Jusqu'à récemment, la majorité des modèles du changement climatique, qu'ils soient technico-économiques ou macroéconomiques, adoptait une représentation exogène du progrès technique, en donnant aux paramètres concernés dans les modèles, une évolution temporelle autonome.

Dans les modèles « ***top-down*** », l'évolution de la **productivité générale des facteurs** est attribuée, comme chez Solow (1957), à des progrès technologiques qui permettent de diminuer, au cours du temps, l'utilisation des facteurs pour produire une quantité de bien constante. Ces gains annuels de productivité générale des facteurs suivent dans la plupart des modèles une trajectoire exogène comprise approximativement entre 2 et 3 pourcents par an (Azar et Dowlatabadi, 1999). Ce type de progrès technique général concerne l'ensemble de l'économie et s'applique à tous les intrants des processus de production.

En d'autres termes, on retrouve bien le paradoxe qui caractérise cette forme de représentation du progrès technique, à savoir que les modèles « *à la Solow* » font d'un progrès technique général « *tombant du ciel* » la principale source de la croissance. Et celle-ci ne se définit donc pas comme le résultat d'un processus d'accumulation de tel ou tel facteur de production (capital humain, équipements productifs). Mais on comprend que, en l'absence de modèles empiriques alternatifs suffisamment éprouvés, les modélisateurs de l'interface énergie-économie aient retenu ce type de solution. Celle-ci est en effet acceptable à partir du moment où l'on pense, comme dans la fable du « ragoût d'éléphants et de lapins »[2] de A. Manne (Hogan et Manne, 1977), que puisque le secteur énergétique ne représente que 2 à 3 % de l'activité économique, toute modification, même forte dans ce secteur a peu de chances d'altérer le moteur général de la croissance.

Une telle hypothèse, permet alors de se concentrer sur un progrès technique spécifique : celui qui concerne le secteur énergétique. C'est à ce niveau que se retrouve la question clé de la répartition entre les évolutions du contenu énergétique de la croissance qui sont dues à un changement technique exogène et celles qui sont provoquées par l'évolution des prix relatifs des facteurs de production.

Dans le secteur énergétique, en effet, le paramétrage des fonctions de production et le choix des élasticités de substitution déterminent, en cas d'une variation des prix relatifs de l'énergie, les substitutions entre (i) les différentes sources d'énergies et (ii) entre le facteur énergie et les autres facteurs de production. Ces substitutions induites par les prix ne permettent cependant pas de reproduire les réductions de l'intensité énergétique de la production des secteurs agrégés qui ont pu être observées sur des périodes historiques où les prix de l'énergie étaient stables. En plus des élasticités de substitutions qui sont un moyen de modéliser par une forme réduite les réactions de la demande d'énergie aux variations de prix, les modélisateurs ajoutent un paramètre spécifique de changement technique autonome, dénommé **amélioration autonome de l'efficacité énergétique** (AAEE, ou AEEI en anglais), qui est un moyen de représenter l'évolution de l'intensité énergétique de la production au cours du temps. Ce paramètre modifie la forme même de la fonction de

[2] Hogan et Manne (1977) proposent la métaphore du ragout d'éléphant et de lapin pour expliciter leur vision des interactions entre le secteur énergétique et le reste de l'économie : si un ragout contient à la fois un lapin (le secteur énergétique) et un éléphant (le reste de l'économie), est-ce qu'en définitive, ce ragout ne ressemblera pas à s'y méprendre à un ragout d'éléphant ?

production et simule une amélioration des technologies de production disponibles. Il permet de représenter le découplage entre la croissance économique et la consommation d'énergie qui a été empiriquement observé et qui ne peut être reproduit par une fonction de production de type CES si le rapport entre les prix des énergies et les prix des autres facteurs reste constant. L'AAEE a le dessein de représenter une tendance du changement technique vers l'amélioration de l'efficacité énergétique qui ne dépend pas des prix de l'énergie. Cependant Dowlatabadi et Oravetz (2006) soulignent que ce coefficient rassemble plus généralement des modifications de l'intensité énergétique de la production non induites par les prix et qui découlent :

- d'un progrès technique qui n'est pas réellement autonome mais induit par d'autres signaux que les prix, comme les normes ou les standards techniques ;
- de modifications comportementales provoquées par l'évolution des goûts et des modes de vie ;
- de changements structurels dans la composition des secteurs productifs agrégés aboutissant à une réduction de l'intensité énergétique de la production, avec par exemple la part de la production de biens manufacturés qui augmente par rapport à celle de l'industrie lourde.

Wing (2006) transpose ces deux mécanismes (amélioration de la productivité générale des facteurs et AAEE) largement utilisés dans la modélisation « *top-down* » aux modèles « ***bottom-up*** » en définissant par analogie (i) un facteur autonome de découplage qui réduit uniformément la demande de services énergétiques au cours du temps, à activité économique constante et (ii) un progrès technique biaisé qui ne concerne que les technologies les plus efficaces ou les moins intensives en carbone. Ce dernier correspond à supposer, *a priori*, que les technologies moins intensives en carbone, recèlent des potentiels de progrès plus importants que celles qui utilisent des énergies fossiles.

En dernier lieu, les modélisateurs se sont très tôt heurtés à la nécessité de représenter, dans les trajectoires simulées, l'apparition potentielle de **techniques de production radicalement nouvelles**. Dans les **modèles macroéconomiques**, l'utilisation de technologies dites « *backstop* » est répandue. L'expression de technologie « *backstop* » a été originalement inventée par Nordhaus (1973) pour désigner un procédé de production pour un bien donné qui ne devient disponible que pour des prix très élevés des intrants du procédé habituel mais qui permet ensuite de produire le bien à coût marginal constant. Dans le secteur énergétique, ces technologies correspondent à des techniques futures que l'on peut anticiper dès aujourd'hui et qui devraient être disponibles sans limite de quantités à un coût donné. Nous pouvons citer à titre d'exemple les cellules photovoltaïques ou la technologie de fusion nucléaire. Une technologie « *backstop* » se matérialise dans un modèle « *top-down* » par une fonction de production alternative dont les agents peuvent profiter à partir d'une certaine date, lorsque les prix des intrants dépassent un niveau donné. Les hypothèses exogènes formulées sur (i) la date future de disponibilité de la technologie « *backstop* » et (ii) l'évolution du prix minimum des autres intrants pour qu'elle pénètre sur le marché traduisent une représentation autonome du progrès technique.

Dans les modèles **technico-économiques**, l'évolution temporelle du portfolio des technologies dans lequel les agents économiques effectuent leurs choix correspond aussi à une représentation autonome du progrès technique. Dans ces modèles, une ou plusieurs technologies, individuellement représentées, peuvent donc apparaître dans le futur avec des caractéristiques prescrites de façon exogène.

Wing (2006) souligne, en relation avec le point précédent, que les hypothèses d'ingénieur sur les améliorations potentielles ultimes de chaque technologie sont forcément exogènes mais qu'il est possible d'endogénéiser le niveau et le rythme auxquels ces potentiels seront exploités.

Les représentations autonomes du progrès technique dans les modèles ont été largement critiquées dans la littérature (Azar et Dowlatabadi, 1999 ; Loschel, 2002), en insistant sur la fragilité des calibrages retenus. Cette difficulté est due au manque de données historiques fiables sur séries longues et cela explique que les valeurs en général adoptées dans les modèles proviennent pour beaucoup de jugement d'experts (Jaccard, 2005). Ceci pose un problème tout particulier compte tenu du rôle critique de ces paramètres dans les conclusions que donnent les modèles aux décideurs politiques, surtout lorsque l'on prétend donner des évaluations à un niveau relativement fin de description des secteurs et du panier technologique.
Dans les scénarios de référence, les tendances exogènes attribuées au progrès technique sont déterminantes quant au niveau de la trajectoire d'émission obtenue et, dans les modèles macroéconomiques, quant à la croissance des PIB régionaux. Si l'on s'en tient au coefficient d'AAEE, les travaux économétriques ne permettent pas de trancher de façon suffisamment claire sur son niveau en longue période, et ce d'autant plus que ce coefficient a lui-même pu varier dans le temps comme le montrent les séries historiques servant pour le calibrage. Or, comme le soulignent Azar et Dowlatabadi (1999), les projections exogènes pour ce paramètre peuvent avoir, dans la trajectoire de référence, un impact fort sur le diagnostic :

> "By assigning a low value for AEEI, say zero, future energy demand and associated CO_2 emissions will grow rapidly and reach very high levels. Policy makers may erroneously conclude that it is impossible to bring down emissions to safe levels. On the other hand, if rather high values are assumed (say 2-3% per year) then business as usual emissions in the models will be so low that policy makers may think that the problem will be solved almost automatically. "
> (Azar et Dowlatabadi, 1999, §3.2)

Plus fondamentalement, ce qui est en cause ici est l'hypothèse de base selon laquelle on pourrait envisager des politiques climatiques très ambitieuses, impliquant des écarts importants par rapport aux scénarios énergétiques de référence et donc des changements technologiques et des changements des modes de consommation majeurs, sans que soit transformée de façon notable la structure de la croissance économiques ou les caractéristiques des technologies disponibles. Dès lors, rien ne garantit que les hypothèses calibrées sur les tendances passées restent valables pour le futur (Grubb et *al*. 2002) et que l'on puisse raisonner « à machine économique et technologique constante ».

2.3 Vers une représentation endogène du changement technique

Pour pallier les lacunes d'une représentation exogène du changement technique, les modèles ont été progressivement modifiés afin d'incorporer les effets possibles des politiques sur l'innovation et le changement technique. Une simple comparaison entre le troisième rapport d'évaluation du groupe III du GIEC (Hourcade et *al.*, 2001, section 8.4.5) et le quatrième (Halsnaes et *al.*, 2007, section 2.7.2 ; Barker et *al.*, 2007, section 3.4.3 ; Barker et *al.*, 2007, section 11.5) permet de constater les efforts importants déployés pour évaluer numériquement les effets de

l'induction du changement technique sur les coûts de stabilisation et le contenu des politiques climatiques[3].

2.3.1 Changement technique induit : les choix de modélisation

Il convient d'abord de dissiper une confusion qui obscurcit passablement la compréhension des efforts pour cesser de représenter le changement technique comme une donnée exogène. Celle-ci vient du fait que l'on passe spontanément de la notion de changement technique endogène à celle de changement technique induit et vice-versa. La distinction est cependant *a priori* très simple : parler de changement technique induit signifie que l'on peut orienter le niveau et la direction du progrès technique dans le domaine énergétique par des politiques explicites. Mais, en retour, on suppose que ce même progrès technique dépend de mécanismes économiques et que l'on se situe dans le cadre théorique des modèles de croissance endogène.

Or les théoriciens de la croissance endogène, s'ils se sont intéressés à l'influence des activités de R&D ou d'accumulation du capital humain sur l'évolution de la productivité et de la croissance économique, n'ont jamais travaillé sur la technologie en tant que telle, au sens où on l'entend dans toute modélisation de l'interface énergie-économie. Les modélisateurs « *bottom-up* » quant à eux ont bien travaillé sur des mécanismes d'induction du changement technique, mais, raisonnant en équilibre partiel, ils n'ont pas perçu le fait qu'il était impossible d'envisager de tels mécanismes en se limitant au seul secteur énergétique. Ils sont alors soumis à la critique selon laquelle leurs résultats n'intègrent pas les « effets d'éviction » entre « domaines » du changement technique.

Les efforts d'endogénéisation du changement technique reflètent ces hésitations : Certains relient le changement technique aux mécanismes de croissance mais sans intégrer de variables de politiques économiques permettant de l'orienter de façon délibérée. D'autres en revanche se concentrent sur l'induction de ce changement dans le secteur énergétique mais sans toucher au mouvement général de la productivité dans les secteurs. D'autres enfin essayent de fournir un cadre intégré, mais nous le verrons, au prix de la réduction des mécanismes d'induction à la seule orientation des politiques de recherche et développement.

- ***Deux formes implicites mais réelles d'endogénéisation : l'hétérogénéité des consommations d'énergie et les générations de capital***

Dans leur majorité, les modèles décrivent avec plus ou moins de précision le caractère hétérogène des modes de consommation d'énergie en fonction des secteurs et des régions. A l'exception des modèles macroéconomiques compacts, les hypothèses formulées sur l'évolution du progrès technique, mêmes si elles conduisent à le représenter de manière exogène, sont attachées à des postes spécifiques de la consommation d'énergie et sont différentes en fonction des régions. La désagrégation des potentiels de progrès technique en fonction des secteurs et des régions permet au final d'obtenir, à l'échelle mondiale, des scénarios de prospective dont les caractéristiques technologiques agrégées (intensité énergétique de l'économie, intensité carbone du système

[3] "A major development since the TAR has been the treatment of technological change in many models as endogeneous, and therefore potentially induced by climate policy, compared to previous assumptions of exogenous technological change that is unaffected by climate policies. " (Barker et *al.*, 2007, section 11.5.1)

énergétique) dépendent du poids relatif des différents secteurs et des différentes régions dans la consommation mondiale d'énergie. Le changement technique à l'échelle globale reflète donc l'interaction endogène entre les différentes régions et secteurs de l'économie. Il est en particulier relié aux structures des consommations finales des ménages et des systèmes productifs régionaux.

A cette prise en compte de l'hétérogénéité des consommations énergétiques, s'ajoute une amélioration aujourd'hui considérée comme acquise dans une partie importante des modèles qui est de représenter l'inertie d'évolution des systèmes techniques, à travers des générations de capital successives (Solow, 1959 ; Burniaux et *al*., 1992). Cette modification constitue en effet une étape importante vers l'amélioration de la description du progrès technique. La pénétration des nouvelles technologies dans les parcs d'équipements ne peut s'effectuer que *via* de nouveaux investissements qui sont destinés à répondre à une croissance de la demande, à remplacer du capital arrivé en fin de vie ou bien à remplacer du capital déjà installé dont la rentabilité n'est plus assurée. Plus largement, l'évolution des caractéristiques techniques agrégées d'une économie dépend des spécificités et des évolutions sectorielles : un secteur dont la production augmente faiblement et dont la durée de vie du capital est importante verra ses caractéristiques techniques évoluer lentement malgré l'apparition d'une nouvelle technologie plus efficace. L'utilisation de générations de capital permet donc d'assurer une cohérence entre les dynamiques sectorielles et l'évolution technique globale. Elle permet également d'établir un lien endogène entre l'évolution technique et la disponibilité des capitaux pour l'investissement, même si l'évolution des frontières de production associées aux nouvelles technologies reste spécifiée de manière exogène (Löschel, 2002).

- ***Les investissements dans la recherche et développement***

L'impact du mécanisme d'induction du changement technique par la R&D se limite en général au secteur énergétique. Cette approche de modélisation consiste à considérer le processus d'innovation comme le résultat d'investissements explicites dans la R&D. Du fait de sa proximité avec les théories de la croissance, ce mécanisme d'induction du progrès technique a reçu une attention soutenue de la part de la communauté des modélisateurs « top-down ». Ceux-ci se sont largement inspirés des idées développées dans les modèles de Lucas (1988), Romer (1990) ou Aghion et Howitt (1998). Ces nouvelles théories s'appuient sur le fait que l'innovation technologique peut être considérée comme une activité économique à part entière. L'intensité et la direction de ce processus dépendent des décisions d'investissement des agents économiques qui cherchent à maximiser leur retour sur investissement. Dans les modèles de l'interface énergie-économie, les avancées théoriques apportées par cette description nouvelle des mécanismes sous-tendant la croissance économique ont conduit généralement à relier le progrès technique directement ou indirectement à un stock de connaissance qui évolue en fonction des investissements dans la R&D. Gillingham et *al.* (2007) effectuent une revue détaillée des choix de modélisation liés à l'incorporation de ce processus dans les modèles.

Les mécanismes d'induction du progrès technique par la R&D sont ainsi généralement modélisés *via* l'existence d'un stock de connaissance dont l'évolution dépend de l'investissement dans R&D. La croissance de cet index de connaissance conduit à des avancées technologiques qui se traduisent de différentes façons en fonction des architectures ou des choix de modélisation. L'investissement dans la R&D peut ainsi jouer sur la forme de la fonction de production lorsque

l'évolution de la productivité d'un ou de plusieurs facteurs est reliée à la croissance d'un stock de connaissance qui lui est éventuellement spécifique.
Dans les modèles compacts qui utilisent des coefficients de conversion permettant de relier les émissions de CO_2 au niveau d'activité général de l'économie ou bien à la consommation d'un facteur agrégé « énergie », l'accroissement du stock de connaissance peut jouer sur l'évolution de ce coefficient, traduisant ainsi un progrès technique orienté vers la décarbonisation du système énergétique.
Enfin, lorsque des technologies sont explicitement représentées dans les modèles, les investissements dans la R&D peuvent conduire à une réduction de leur coût. Cette spécification s'applique en particulier aux technologies « *backstop* ».

Les premiers efforts de modélisation ont été accomplis par Goulder et Schneider (1999) qui introduisent dans un modèle d'équilibre général dynamique un stock de connaissance dont l'évolution dépend des investissements de R&D et qui vient se substituer dans les fonctions de production sectorielles aux autres intrants. Nordhaus (1999, 2002) propose le modèle R&DICE qui est une version du modèle DICE (Nordhaus, 1994) dans laquelle le coefficient qui lie le niveau d'émission à la production décroît en fonction des investissements dans la R&D. Ces investissements deviennent une variable de commande supplémentaire qui s'ajoute à l'effort d'abattement, et ils viennent se soustraire à la consommation dans l'utilisation des ressources de l'économie mondiale. Le modèle ETC-RICE (Buonanno et *al.*, 2003) incorpore des stocks de connaissance régionaux dont l'évolution dépend des investissements régionaux dans la R&D. Ces stocks de connaissance interviennent à la fois dans les fonctions de production en améliorant la productivité générale et des facteurs et dans l'évolution du contenu carbone de la production.
Plus récemment, dans le modèle FEEM-RICE (Bosetti et *al.*, 2006), la production est représentée par une fonction Cobb-Douglas à trois intrants : du travail, du capital et de l'énergie carbonée. Les émissions de CO_2 sont obtenues à partir de la consommation d'énergie carbonée par l'application d'un cœfficient de conversion. L'accroissement du stock de connaissance *via* les investissements de R&D permet l'augmentation d'un index de changement technique pour l'énergie. La croissance de cet index conduit simultanément à l'amélioration de la productivité du facteur énergie dans la fonction de production et à la décroissance de l'intensité carbone du facteur « énergie carbonée ».
Dans le modèle ENTICE-BR (Popp, 2006), l'effort de R&D se partage entre deux stocks de connaissance distincts. L'un se substitue à l'énergie dans la fonction de production suivant une spécification CES et traduit des gains d'efficacité énergétique. L'autre permet la décroissance du coût de la technologie *backstop*. Ce modèle simule un double arbitrage quant à l'effort de R&D, l'un concerne son intensité, l'autre son allocation.
Dans le modèle MIND (Edenhofer et *al.*, 2006) la représentation endogène du changement technique dépasse le périmètre du secteur énergétique. L'effort de R&D se partage entre deux stocks de connaissance. Le premier améliore la productivité du travail dans la fonction CES à trois intrants (travail, énergie, capital) qui décrit la production alors que le second joue sur la productivité du facteur énergie. Contrairement au modèle FEEM-RICE, l'investissement dans la R&D n'influe pas sur le contenu carbone du facteur agrégé énergie qui est relié à un module énergétique de type « *bottom-up* ».
Dans la majorité de ces modèles, les trajectoires sont soumises à un bouclage macroéconomique et leur objectif est de déterminer une trajectoire optimale de partage entre consommation,

investissement dans le capital et investissement dans la R&D, en réponse à l'imposition d'une contrainte climatique. Les dépenses de R&D s'amputent donc naturellement sur le montant des ressources disponibles dans l'économie. Le fait de savoir comment les dépenses additionnelles de R&D imposées par l'impératif de décarbonisation de l'économie s'amputent sur la consommation, sur l'investissement productif ou sur le budget de R&D, constitue un point central pour l'analyse des coûts des politiques climatiques. Or il n'est pas certain, dans les faits, que l'arbitrage s'effectue de façon aussi rationnelle que dans un modèle allocation optimale qui, *a priori*, peut conclure à une augmentation de l'enveloppe globale de la R&D.

Certains auteurs soutiennent, en effet, que les ressources disponibles pour investir dans la R&D sont partiellement inélastiques (Goolsbee, 1998). La conséquence est que l'induction d'investissements dans la R&D par les politiques climatiques s'effectue à budget R&D constant, et donc au détriment de l'accumulation du stock de connaissances dans les autres secteurs (Popp, 2004 a, b). Or cet effet d'éviction (*crowding out effect*) entre différentes utilisations possibles des ressources de R&D a des conséquences beaucoup plus importantes sur le fonctionnement de l'économie que l'éviction de ces dépenses au détriment de l'investissement dans le capital productif ou de la consommation. De nombreuses études empiriques concluent en effet que la rentabilité sociale des investissements de R&D est plus importante que la rentabilité privée anticipée par l'agent qui a effectué l'investissement.

Une dépense additionnelle de R&D pour la décarbonisation amputée sur les budgets de R&D des autres secteurs a un coût social plus important que si celle-ci s'était effectuée au dépend de l'investissement productif. Or, le mécanisme d'éviction se nourrit en quelque sorte de lui-même : comme les agents privés vont investir dans la R&D jusqu'à ce que la rentabilité anticipée soit égale à celle anticipée pour les autres investissements, on débouche sur un sous-investissement aggravé en R&D dans les autres secteurs de l'économie si la rentabilité de l'investissement en R&D dans les technologies de décarbonisation augmente.

La contrainte existant éventuellement sur la taille de l'effort total de R&D est alors fondamentale puisque c'est elle qui traduit dans les modèles le caractère partiellement inélastique de ce type d'investissement. Goulder et Schneider (1999) distinguent ainsi les investissements de R&D en fonction des secteurs de production vers lesquels ils sont dirigés et supposent en plus que la croissance des ressources disponibles pour investir dans la R&D est limitée. Ils obtiennent finalement que les effets d'éviction entre les secteurs pour l'allocation de l'effort de R&D influent fortement sur leurs résultats.

On notera cependant l'écart qui existe, dans les modèles empiriques, entre le cadrage théorique et les solutions de modélisation. Dans la grande majorité des cas, les modèles ne relient pas le progrès technique dans les secteurs non énergétiques à un effort de R&D spécifique, mais les modélisateurs utilisent une règle approximative fixant la rentabilité sociale de l'investissement dans la R&D comme quatre fois supérieur à la rentabilité de l'investissement dans le capital productif (Nordhaus, 2002 ; Bosetti et *al.*, 2006 ; Popp, 2006). En effectuant en plus une hypothèse sur la part des dépenses de R&D allouées à la décarbonisation qui est effectivement prise sur le budget de la recherche améliorant la productivité d'autres facteurs non énergétiques, les auteurs amputent l'équation dynamique d'évolution du capital productif (1.4) :

$$K_t = \left(I_t - 4 \cdot \lambda \cdot R\&D\right) + \left(1 - \delta\right) \cdot K_{t-1} \qquad (1.4)$$

où K est le capital productif, I_t l'investissement courant, δ le taux de dépréciation, λ le paramètre d'éviction et *R&D* les dépenses de recherche et développement pour la décarbonisation. A titre d'exemple, Popp (2006) fixe la valeur du paramètre d'éviction à 50% en faisant l'hypothèse que la moitié de l'investissement dans l'effort de R&D pour la décarbonisation est soustrait à l'effort de R&D pour les autres secteurs.

- ***L'apprentissage technologique***

Pour incorporer le mécanisme d'**apprentissage par la pratique** (***learning by doing***) dans les modèles, les auteurs ont largement eu recours à des courbes d'apprentissage. Ces courbes relient l'évolution du coût d'une technologie au cumul des capacités installées. Le procédé d'apprentissage est en général supposé exponentiel à élasticité constante (Equ. (1.5))

$$C = \alpha \cdot K^{-\beta} \quad (1.5)$$

où C représente le coût en capital de la technologie et K le cumul des capacités installées. Le paramètre β est relié dans la littérature au taux d'apprentissage (*LR*) qui est d'un abord plus concret. Le taux d'apprentissage correspond en effet au pourcentage de réduction du coût en capital associé à un doublement du cumul des capacités installées (Equ. (1.6)).

$$LR = 1 - 2^{-\beta} \quad (1.6)$$

Avec ces fonctions, le coût d'une technologie peut décroître indéfiniment pour atteindre zéro asymptotiquement. Par soucis de réalisme, certains modélisateurs ont introduit des asymptotes non nulles à la décroissance du coût en capital des technologies (*FC* dans l'équation (1.7)). A titre d'exemple, Sano et *al.* (2006) proposent la forme fonctionnelle suivante :

$$C = \left(C_0 - FC\right) \cdot \left(1 - LR\right)^{\log(K/K_0)/\log(2)} + FC \quad (1.7)$$

De nombreuses revues, s'appuient sur des travaux économétriques qui existent dans la littérature pour fournir des taux d'apprentissage associés à des technologies énergétiques explicites (*cf.* par exemple, Wene, 2000 ; McDonald et Schrattenholzer, 2001).

En raison de la proximité de ce mécanisme avec la prospective technologique, la communauté de modélisation « *bottom up* » a largement exploré la possibilité de représenter un changement technique endogène par ce biais. La voie « naturelle » a été d'associer des courbes d'apprentissage aux technologies explicitement représentées dans ces modèles. Cette tache s'est avérée plus ou moins difficile en fonction de l'architecture des modèles.

Dans les **modèles de simulation en équilibre partiel** du secteur énergétique, l'introduction des courbes d'apprentissage rajoute une relation dynamique supplémentaire entre les variables du modèle, ce qui permet de décrire de façon plus réaliste l'évolution du coût en capital des technologies en réponse aux signaux transmis par les variations des prix finaux de l'énergie.

La situation change dans les **modèles d'optimisation du système énergétique**. A l'origine, la résolution de ces modèles nécessitait une optimisation linéaire visant à minimiser le coût complet actualisé du système énergétique sur un horizon temporel donné. L'introduction de courbes d'apprentissage rend le problème d'optimisation non-linéaire et non-convexe. En effet, l'investissement dans de nouvelles technologies plus efficaces est plus coûteux en début de période par rapport aux technologies conventionnelles mais conduit ensuite à une réduction de coût qui peut

les rendre, à partir d'un certain niveau d'investissement cumulé, plus rentables que les secondes. Le problème revient à trouver une trajectoire d'investissement qui optimise la différence entre les réductions futures des coûts et le surcoût d'investissement dans les premières périodes du modèle afin de provoquer l'apprentissage. Wene (2000) parle ainsi « d'investissements d'apprentissage » nécessaires pour mener les nouvelles technologies à un niveau de compétitivité égal à celui des technologies conventionnelles concurrentes. Messner (1997) a été la première à introduire des courbes d'apprentissage dans le modèle d'optimisation du système énergétique, MESSAGE. Des expériences similaires sont ensuite apparues pour d'autres modèles du même type, en particulier pour le modèle MARKAL (Barreto et Kypreos, 1999). Dans tous les cas, des problèmes calculatoires importants ont été rencontrés du fait de l'apparition de rendements croissants créant une boucle de rétroaction positive dans les systèmes, les rendant alors instables. La résolution des modèles se heurte à un problème d'optimisation hautement non-linéaire avec des équilibres multiples potentiels. Les algorithmes standards de résolution sont incapables de traiter ces problèmes car ils ne font pas la différence entre optimum local et optimum global (Löschel, 2002). De nouvelles techniques calculatoires sont apparues, comme la programmation partielle en nombre entiers (*mix integer programming*) mais les résultats restent très sensibles aux conditions initiales et nécessitent des ressources calculatoires importantes.
Il est intéressant ici de noter qu'il existe quelques tentatives, dans la communauté de modélisation « *bottom-up »,* de prendre en compte, dans un même modèle, à la fois la R&D et les mécanismes d'apprentissage pour endogénéiser le changement technique. Ces tentatives (*cf.* Kouvaritakis et *al*. (2000), par exemple) reposent sur l'utilisation de courbes d'apprentissage à deux facteurs (expérience et R&D). Qualitativement, l'hypothèse centrale de ces modèles à fort détail technologique est qu'à budget R&D constant, l'effet d'éviction s'opère au sein du panier des technologies énergétiques, sans affecter la productivité générale de l'économie.

Malgré l'absence d'une description explicite des technologies, certains **modèles macroéconomiques** ont largement exploré les implications de l'apprentissage par la pratique pour les politiques climatiques. Comme pour l'induction du progrès technique par la R&D, les modèles de contrôle optimal rassemblent ici la majorité des efforts de modélisation. En effet, ces modèles ont été mobilisés pour calculer des politiques optimales face à un objectif de stabilisation climatique donné. Dans ce contexte, les potentiels associés à l'apprentissage par la pratique sont pris en compte du fait de leur importance dans la formation dynamique des coûts d'abattement. Les phénomènes d'apprentissage par la pratique sont représentés de façon stylisée et jouent sur les mêmes paramètres que pour le progrès technique induit par les politiques de R&D, à savoir la productivité des facteurs dans la fonction de production, les coefficients de conversion utilisés pour calculer les émissions ou bien les caractéristiques de la technologie « *backstop »*. L'apprentissage est considéré dans ces modèles soit seul, soit en association avec une induction du progrès technique par les investissements de R&D.
A titre d'exemple, dans le modèle FEEM-RICE (Bosetti, 2006), l'abattement cumulé joue le rôle de variable d'apprentissage et entre de pair avec l'effort de R&D dans la formation de l'index de changement technique. Cet index améliore la productivité du facteur énergie dans la fonction de production et en même temps permet de diminuer l'intensité carbone de ce facteur. Une version récente du modèle DEMETER (Gerlagh, 2006) distingue la production d'énergie à partir de combustibles fossiles de celle n'émettant pas de CO_2. Se rajoute à cela une activité de captage et

stockage du CO_2. Des courbes d'apprentissages distinctes sont utilisées pour relier le coût de chacune des options au cumul des investissements réalisés dans chacune de ces activités.

- ***Les externalités technologiques positives***

La littérature (Clarke, 2006 ; Köhler, 2006) souligne largement l'importance des externalités technologiques positives dans la représentation endogène du progrès technique en mettant en avant les difficultés autant liées à la modélisation du phénomène qu'à son calibrage. Des efforts importants ont été entrepris pour représenter ce mécanisme dans les modèles, l'objectif étant de relier le progrès technique effectué dans un secteur et/ou une région aux efforts déployés dans les autres secteurs et/ou régions.

Les externalités concernent à la fois l'induction du progrès technique *via* les investissements de R&D et l'apprentissage par la pratique. Dans ce dernier cas, l'échelle régionale à laquelle les courbes d'apprentissage sont appliquées gouverne l'intensité des externalités positives permettant le transfert de l'expérience acquise entre différentes régions. Des externalités positives entre les expériences accumulées pour des technologies différentes sont représentées *via* l'usage de courbes d'apprentissage communes pour tout un groupe de technologies. Ce choix de modélisation reflète les bénéfices croisés qui peuvent émerger entre des développements technologiques différents. Par exemple, dans le modèle MESSAGE (Rao et *al*., 2006), il n'existe qu'une seule courbe d'apprentissage pour toutes les technologies de captage et stockage du CO_2 ou pour toutes les technologies photovoltaïques (production d'électricité centralisée ou décentralisée).

Dans le cas de la représentation de l'induction du progrès technique par le biais des investissements de R&D, les externalités positives liées à l'innovation dépendent de l'hypothèse qui est faite sur le caractère privé des bénéfices liés à l'évolution du stock de connaissance résultant de ces investissements. Les modèles peuvent représenter des externalités positives entre différents secteurs ou bien entre différentes régions. Dans le modèle ETC-RICE, Buonanno et *al*. (2003) représentent les externalités technologiques positives entre régions en multipliant les fonctions de production agrégées de toutes les régions par un facteur d'efficacité qui dépend de la somme de tous les stocks de connaissance régionaux. L'introduction d'un stock de connaissance « mondial » permet de décrire les bénéfices que peut tirer gratuitement une région des efforts de R&D fournis par les autres régions. Le stock de connaissance mondial permet aussi de réduire les coefficients régionaux représentant l'intensité carbone des productions.

2.3.2 Implications des choix de modélisation pour l'évaluation des politiques climatiques

L'enjeu de la représentation endogène du changement technique est entré dans le débat politique sur le changement climatique avec la question du **tempo de l'action**. Ce débat s'est rapidement développé après l'article de Wigley et *al*. (1996) qui souligne que de nombreuses trajectoires d'émissions sont compatibles avec un même objectif de stabilisation et qu'une trajectoire de stabilisation ne mettant en jeu qu'un effort limité d'abattement sur le court terme est économiquement la plus efficace. Un des arguments clé qui justifie de retarder dans le temps

l'effort de réduction est que le délai supplémentaire peut être utilisé pour réduire le coût des technologies de décarbonisation et éviter un remplacement accéléré du capital productif. A cela s'ajoute le fait que la valeur présente des coûts d'abattement se trouve réduite, à cause de l'actualisation ; et que, pour des raisons tenant à la climatologie, le budget d'émission sur le siècle, pour un objectif de concentration donné, est plus important pour des trajectoires où les émissions sont plus importantes en début de période puis sont réduites de manière plus agressive.
Cette argumentation a suscité une réponse d'Ha-Duong et al. (1997) qui faisait valoir, position d'ailleurs reprise dans les deuxième et troisième rapports du GIEC, que, vu « *l'océan d'incertitude* » qui caractérise ce dossier, l'objectif n'est pas de choisir une trajectoire jusqu'à la fin du siècle, mais de regarder quelles réponses de court et moyen terme permettent de réajuster la trajectoire initiale au fur et à mesure que de nouvelles informations apparaissent. La bonne approche est donc celle d'un schéma de décision séquentielle qui peut s'effectuer, techniquement, selon deux modalités :

- Dans une approche **coût/bénéfice** qui consiste à mettre en balance les coûts d'une politique de réduction des émissions avec les dommages évités du changement climatique, l'objectif est de déterminer le niveau optimal de stabilisation de la concentration atmosphérique de gaz à effet de serre. Il faut donc prendre en compte, dans un premier temps, l'incertitude qui entoure aujourd'hui à la fois la fonction de dommage (fonction qui relie l'évolution de la température au niveau des dommages) et la fonction de coût (fonction qui détermine le coût des politiques climatiques permettant d'atteindre un objectif de stabilisation à un niveau de concentration donné). La démarche proposée revient à minimiser l'espérance mathématique de la somme des coûts des dommages et de l'action d'abattement en considérant que les incertitudes reliées aux fonctions de coût et de dommage se résolvent à une date future donnée (par exemple 2020 ou 2030).
- Dans une approche **coût/efficacité**, l'objectif est de rechercher le tempo d'action le moins coûteux face à un objectif de stabilisation des émissions. Il faut cependant prendre en compte que l'on ignore aujourd'hui si le niveau souhaitable de stabilisation des concentrations vaudra finalement 450, 550 ou 650 ppmv. Similairement à la méthode développée pour l'approche coût/bénéfice, la démarche revient à minimiser l'espérance mathématique du coût de l'action sur le siècle en supposant que la « vraie » valeur de l'objectif de stabilisation n'est connue qu'à une date future donnée, par exemple 2020 ou 2030.

Dans ce dernier cas, le problème revient à effectuer un arbitrage entre les économies faites en retardant l'action et les risques pris en cas de mauvaise nouvelle qui apparaîtrait dans le futur et qui impliquerait une accélération des politiques d'abattement. Nous retrouvons l'expression de cette problématique en synthétique dans le second rapport du GIEC :

> "The choice of abatement paths thus involves balancing the economic risks of rapid abatement now (that premature capital stock retirement will later be proved unnecessary) against the corresponding risk of delay (that more rapid reduction will then be required, necessitating premature retirement of future capital stock)"
> (GIEC, 1996)

Tout se joue alors sur l'inertie des systèmes techniques sur laquelle insistent Ha-Duong et *al.* (1997), et l'ampleur de cette inertie est déterminée par deux principaux mécanismes :

- La vitesse de **renouvellement du capital installé** ;
- et la vitesse de **déploiement de l'innovation**.

C'est ici que le choix entre un traitement exogène ou endogène du progrès technique est décisif en termes de conclusion décisionnelle. Dans l'article de Wigley et *al*. (1996) en effet, le progrès technique suit une évolution autonome, son déploiement est donc indifférent au profil d'abattement des émissions qui est adopté. Si en revanche le progrès technique est traité de manière endogène et dépend en grande partie du mécanisme d'apprentissage par la pratique, une action précoce permet de réduire les coûts ultérieurs des technologies de substitution aux énergies fossiles et, en même temps de réduire l'importance de l'effet irréversibilité lié à l'inertie des stocks d'équipements (Grubb et *al.*, 1995).

L'introduction d'un changement technique endogène permet en outre de prendre en compte les mécanismes d'apprentissage qui concernent les technologies à fort contenu en carbone. Dès lors, repousser les efforts d'abattement revient à favoriser à court terme des technologies intensives en carbone qui se retrouvent ainsi améliorées. Dans le futur, la capacité d'adaptation du système énergétique peut se retrouver fortement réduite par un phénomène de blocage dans des trajectoires intensives en carbone (*lock-in*). En introduisant des rendements d'échelle croissants, le changement technique endogène conduit à mieux saisir ces effets de bifurcation et de dépendance au sentier (Arthur, 1989) qui peuvent s'avérer fondamentaux pour évaluer l'efficacité d'une politique climatique de manière réaliste. Ces phénomènes de bifurcation sont d'autant plus importants lorsqu'ils sont étendus à des systèmes techniques aux temps caractéristiques d'évolution très longs, tels les réseaux de transport ou les modes d'aménagement du territoire (Lecocq et *al.*, 1998).

La représentation du changement technique induit dans les modèles a conduit ces dernières années à une **réévaluation du coût des politiques climatiques**. L'induction du changement technique par les politiques climatiques permet de réduire leur coût sur le long terme (Barker et *al.*, 2007, p652) mais c'est principalement parce qu'il offre une marge de manœuvre qui est ignorée dans un schéma de changement technique exogène, c'est-à-dire la possibilité d'accélérer son déploiement en haussant le niveau de l'action d'abattement sur le court terme. Si le résultat qui lie la réduction des coûts des politiques climatiques et l'induction du progrès technique paraît robuste, les différences entre les modèles concernant l'évaluation absolue des coûts restent très importantes. Ainsi, alors que le troisième rapport d'évaluation du GIEC concluait que les hypothèses exogènes concernant le progrès technique étaient déterminantes dans la formation des coûts des politiques et sources de la dispersion des résultats (Hourcade et *al.*, 2001), le quatrième rapport souligne la part déterminante des modes de représentation de l'induction du changement technique (« *learning by doing* », R&D, « *spillovers* ») et du paramétrage numérique de ces phénomènes (taux d'apprentissage, taux de rentabilité des efforts de R&D etc…) dans l'explication de la très grande disparité des résultats entre les modèles (Fisher et *al.*, 2007).

Enfin, les avancées dans la représentation de l'induction du changement technique par les politiques climatiques apportent un éclairage nouveau sur le débat politique concernant le bien-fondé d'une **action unilatérale** (pour un groupe de pays) de réduction des émissions. Avec une représentation exogène du progrès technique, les externalités liées à une telle décision sont essentiellement négatives. Il s'opère un phénomène de fuite des émissions (Böringher et Löschel,

2002) : une partie de l'effort d'abattement consenti par le groupe des régions proactives se retrouve compensée par une hausse des émissions dans les autres régions du monde due à la relocalisation des activités de production intensives en énergie. Dans un cadre de progrès technique endogène, apparaissent des externalités technologiques positives provenant de la diffusion internationale des progrès technologiques induits par la politique climatique mise en œuvre dans les régions agissant unilatéralement. En cas d'avancées technologiques substantielles induites par la politique climatique, un bénéfice potentiel peut apparaître pour les régions qui bénéficieront des droits de propriété associés à ces technologies. Avec les réductions de coûts induites par la politique climatique, ces nouvelles technologies peuvent en effet devenir compétitives avec les technologies conventionnelles, même en l'absence d'incitations, et être ensuite capables de pénétrer sur les marchés des régions suiveuses (« *first mover advantage* »).

Les efforts d'amélioration de la représentation du changement technique dans les modèles ont ainsi contribué à modifier un certain nombre d'affirmations pour la décision publique – sur le tempo optimal de l'action, les instruments à mettre en œuvre et les coûts nets des politiques de réduction. Le tableau suivant tiré du dernier rapport d'évaluation du GIEC propose une synthèse des conséquences de ces nouvelles représentations.

	Changement technologique exogène	Changement technologique endogène
Mécanismes	Le changement technique suit une trajectoire autonome indépendante du contexte	Le changement technique dépend de réponses comportementales concernant (i) les choix d'investissements de R&D, (ii) les choix d'investissement pour les nouvelles capacités et les effets d'apprentissage qui en découlent
Implications pour la modélisation :		
Terminologie	Exogène	Endogène / Induit
Paramètres usuels	AAEE – Amélioration Autonome de l'Efficacité Energétique	Externalités (*spillovers*), Taux d'apprentissage (*learning rate*), rentabilité de l'effort de R&D
Implications pour le calcul optimal	Optimum unique avec algorithmes standards	Possibilités d'équilibres multiples ; difficultés d'identification de l'optimum global
Conséquences économiques / pour la décision		
Coûts de la stabilisation des concentrations de GES	Stabilisation en dessous de 550 ppmv CO_2 très coûteuse en l'absence de changement technique supplémentaire	Stabilisation ambitieuse possible, coût modeste dépendant des hypothèses de progrès technique induit
Instruments des politiques pouvant être modélisés	Taxes, permis négociables	Taxes, permis négociables, incitations à la R&D, subventions technologies nouvelles
Conséquences sur le tempo de l'action	Coût marginal social du carbone croissant au taux d'actualisation	Efforts plus importants requis à court terme pour baisser les coûts à long terme
Bilan pour les premiers à agir (« *first movers* »)	Coûts nets, bénéfices faibles	Bénéfices potentiels du leadership technologique, dépendant des règles de propriété de la connaissance
Externalités internationales, fuite du carbone	Externalités négatives à cause de la fuite du carbone (un effort d'abattement dans une région conduit à la relocalisation des activités industrielles dans les autres régions)	Des externalités négatives continuent d'exister *via* le phénomène de fuite de carbone mais il existe aussi des externalités positives liées à la diffusion internationale du progrès technique

Tableau 1 : Implications des modes de représentation du changement technique

Source : Barker et *al.* (2007), Table 11.13

3 Pour une vision élargie de l'induction au changement structurel

3.1 Les limites de l'art

Un retour sur les modes de représentation de l'induction du changement technique dans les modèles du changement climatique révèle l'existence d'une frontière qui reste fortement marquée entre les modèles « *top down* » et « *bottom up* ».

Les modèles « *bottom up* » ont, en général, largement introduit des courbes d'apprentissage (éventuellement à deux facteurs) au sein du portfolio technologique dans lequel s'effectuent les choix techniques visant à simuler ou à optimiser l'évolution du secteur énergétique. Dans ces modèles, les postes de consommation énergétique sont très détaillés tant au niveau du système d'offre d'énergie primaire, que de celui de transformation ou de consommation finale. L'induction du changement technique par les politiques climatiques s'applique donc à des technologies spécifiques au sein d'une description détaillée du système énergétique, offrant en particulier une représentation réaliste de l'inertie des équipements considérés. Les effets de système procédant de l'induction du changement technique sont bien pris en compte à l'intérieur du secteur énergétique. Cependant, on note l'absence, dans ces modèles, des rétroactions possibles des évolutions du secteur énergétique sur les trajectoires macroéconomiques en termes de structure, de productivité ou d'échanges commerciaux qui influent fortement sur la vitesse, la direction et la distribution régionale de la croissance économique. Des efforts ont été entrepris pour coupler les modèles « *bottom up* » à des modules de croissance macro-économiques (*cf.* MARKAL-MACRO, MESSAGE-MACRO), mais ce sont en général des modèles de croissance optimale, très agrégés, inspirés du modèle de Ramsey-Cass-Koopmans (Ramsey, 1928 ; Cass, 1965; Koopmans, 1965). Ces modules macroéconomiques ne permettent cependant pas de prendre en compte l'hétérogénéité régionale et sectorielle des rétroactions qui existent entre les évolutions technologiques du système énergétique et les trajectoires de croissance. En particulier ces modèles manquent de détail pour représenter :

- les contraintes sectorielles et régionales liées à la **disponibilité de l'investissement** pour financer les nouveaux équipements énergétiques ;
- les mécanismes spécifiques de **formation de la demande** de certains services énergétiques comme le besoin de mobilité qui dépend de politiques d'investissement dans des secteurs non énergétiques tels que les infrastructures ou l'immobilier ;
- les possibles **modifications structurelles de l'activité** induites par l'évolution du système énergétique, par exemple la dématérialisation ;
- et enfin les processus de **localisation internationale des activités** fortement consommatrices d'énergie qui répondent à l'évolution du coût final de l'énergie mais aussi à celle des prix des autres facteurs de production, en particulier du travail.

L'effort de représentation endogène du progrès technique s'est principalement concrétisé dans la communauté « *top down* » avec des modèles compacts de croissance optimale incluant des courbes d'apprentissages par la pratique et/ou des possibilités d'investissement dans la R&D. Généralement, ces modèles allouent de façon optimale les ressources de l'économie entre consommation, investissement productif et une ou plusieurs autres variables de contrôle qui mènent à la réduction des émissions. Ils peuvent représenter une économie agrégée à l'échelle mondiale (comme le modèle R&DICE) ou comprendre plusieurs régions différentes (*cf.* les modèles issus de RICE ou le modèle MIND). Malgré les apports indiscutables qu'ils ont apportés dans la réflexion sur le tempo optimal de l'action ou l'évaluation du coût des politiques climatiques avec ou sans une représentation endogène du progrès technique, trois critiques principales peuvent leur être adressées :

- La forme très agrégée des fonctions de production ne permet pas de saisir le **caractère hétérogène des postes de consommation d'énergie** qui se limitent dans la plupart des cas à une distinction entre deux types d'énergie (avec ou sans émission de carbone). Certains modèles détaillent en plus la consommation d'énergie électrique mais la consommation d'énergie du secteur des transports n'est en général pas considérée en tant que tel. Nous retrouvons ici la critique que nous adressions aux modules macroéconomiques couplés aux modèles « *bottom-up* » qui ne peuvent pas saisir les spécificités des rétroactions entre la formation de la demande et les dynamiques technologiques sectorielles.
- Cette représentation à une échelle agrégée de la consommation énergétique dans les fonctions de production renvoie aussi à l'absence de représentation de **technologies énergétiques spécifiques**. A l'exception de quelques cas (comme la technologie de captage et stockage du CO_2 dans le modèle MIND par exemple), l'induction du progrès technique par les politiques climatiques ne concerne pas, dans ces modèles, des technologies explicites. Au contraire, ce sont la productivité du facteur énergétique dans la fonction de production ou les coefficients de contenu carbone de l'énergie qui sont modifiés à une échelle très agrégée par le progrès technique induit *via* les politiques climatiques. Aucune de ces évolutions n'est cependant reliée à une réalité technologique particulière qui pourrait prendre en compte des contraintes spécifiques informées par une expertise sectorielle. De plus, l'usage fréquent de fonctions de production à élasticité de substitution constante pose le problème de leur paramétrage qui, même s'il découle d'études économétriques menées sur des tendances passées, peut ne pas rester valable dans le futur, et ce d'autant plus si des politiques visent à atteindre des objectifs de stabilisation climatique (Grubb et *al*. 2002).
- Enfin, malgré une proximité théorique importante, les modèles macroéconomiques incluant une représentation endogène du changement technique dans le secteur énergétique, n'étendent en général pas cette spécification au **moteur de croissance**. A l'exception des modèles MIND ou ETC-RICE, l'évolution de la productivité générale des facteurs reste majoritairement exogène dans les modèles du changement climatique. Face à des mutations aussi importantes que celles qui sont nécessitées par un effort poussé de décarbonisation des économies, il semble pourtant légitime d'explorer l'impact des politiques climatiques sur la croissance de long terme.

3.2 Problèmes posés et cahier des charges pour une nouvelle architecture de modélisation

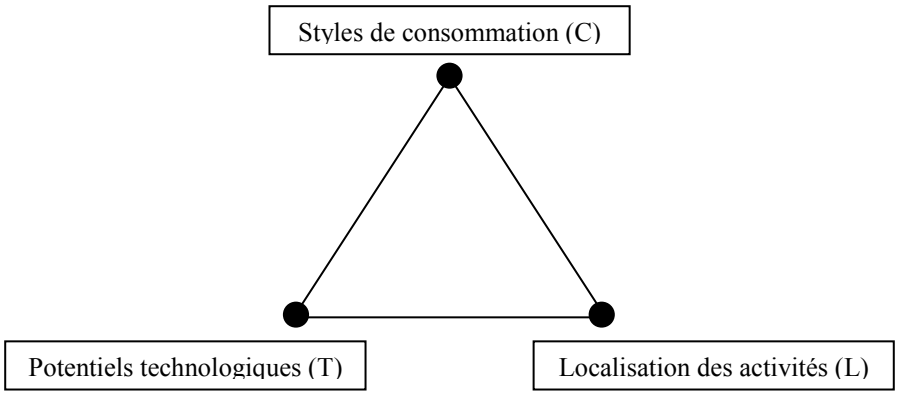
Le diagnostic qui peut être tiré de ce qui précède, et qui justifie l'effort qui sera conduit dans cette thèse, est que les modélisateurs sont encore « au milieu du gué » dans leur tentative de représentation d'un changement technique susceptible d'être modifié par les politiques climatiques. Dans les modèles **macroéconomiques,** la R&D est seule réellement représentée (les mécanismes d'apprentissage par la pratique ne concernent que rarement des technologies explicites), et ceci de façon très agrégée, alors même que le calibrage de fonctions liant dépenses de R&D et gains de productivité reste un exercice fort fragile. Dans les modèles **technico-économiques**, si l'introduction de spécifications de progrès technique induit est indubitablement une avancée en matière de réalisme des trajectoires simulées, il n'en reste pas moins que le progrès technique ne

concerne presque toujours que le secteur énergétique et se déploie au sein d'économies dont le fonctionnement est supposé être sans friction et dont les caractéristiques restent majoritairement figées ou évoluent de façon exogène. Notre objectif pour cette thèse qui définit en même temps le cahier des charges de notre exercice de modélisation se décline en trois chantiers :

3.2.1 Etudier la transition entre changement technique induit et changement structurel induit

Une des caractéristiques de la discussion méthodologique autour du changement technique induit est qu'elle mêle la notion de transformation du « panier » des techniques disponibles (a-t-on la possibilité d'induire une amélioration des offres énergétiques peu émettrices ?) et celle de changement structurel. La confusion est évidente pour le coefficient d'AEEE qui regroupe à la fois le mouvement vers une plus grande efficacité des équipements utilisateurs d'énergie et des tendances au découplage entre croissance des revenus et demande de services énergétiques. Ce découplage est la marque de changements structurels qui, en toute rigueur, devraient résulter d'interactions entre la structure de la demande finale, celle de la matrice interindustrielle et les gains de productivité dans chaque secteur. Or, il est peu probable que ces interactions restent inchangées en cas de mise en place de politiques drastiques de décarbonisation de l'économie, sauf à considérer, sans autre forme d'examen, qu'une telle décarbonisation peut s'effectuer par la seule transformation du système d'offre énergétique et sans modifier la structure de la demande finale.

Qu'ils soient fondés sur une approche « *bottom-up* » ou « *top-down* », les modèles multisectoriels présentent un traitement plus cohérent du changement structurel mais qui est limité par l'hypothèse fondamentale selon laquelle les fonctions de demande restent inchangées tout au long des trajectoires. En fait, les interactions entre transformation du panier technologique et changement structurel renvoient à des mécanismes plus complexes que Hourcade (1993) propose de traiter, en reprenant une conceptualisation de I. Sachs sur les modes de développement, comme résultant des interactions, au sein d'un triangle C-T-L, entre :



Les interactions entre ces trois pôles sont bien sûr d'ordre économique, mais elles dépendent aussi du contenu matériel qui leur est associé. Ainsi, une stratégie technologique misant sur des

économies d'échelle n'aura pas le même impact sur la distribution spatiale des activités qu'une stratégie misant sur la flexibilité et la minimisation des risques d'investissement qu'apporte une structure de production composée d'entités de petite taille (filière coke-oxygène *vs* réduction directe au gaz dans la sidérurgie, par exemple). De même, les potentiels d'amélioration technologique sont déterminants dans la transformation même des styles de consommation : la capacité de construire des résidences de type pavillonnaire à faible consommation d'énergie, couplée à des progrès rapides sur l'efficacité des véhicules automobiles seront des facteurs déterminants de la croissance de la demande de mobilité.

En d'autres termes, il y a donc bien co-induction entre changement structurel et changement des techniques, mais, pour la décrire, il faut adopter un cadre de modélisation en **équilibre général** qui permette en plus de descendre, dans la **description de la croissance** et de son **contenu matériel**, aux mécanismes déterminants sur le long terme - localisation des activités, dématérialisation, technologies disponibles, etc.. – et, logiquement, aux leviers d'action collective qui pourront permettre de les infléchir dans la direction souhaitée. Explorer de telles implications suppose de décrire les économies non seulement en termes de flux économiques mais en termes de contenu « physique » : surface du parc bâti, mobilité, équipement des ménages, structure des transports, technologies du secteur énergétique, besoins en transports de marchandises etc.

Une part de ces paramètres est prise en compte dans les modèles énergétiques mais avec un manque de mise en cohérence entre leur évolution et les principaux déterminants macroéconomiques, comme la distribution des revenus ou les contraintes de financement.

Dans les modèles macroéconomiques, l'usage de fonctions de production classiques et le caractère peu tangible de la notion de « capital » qui est égale, en toute rigueur, à la somme des investissements passés (modulo leur amortissement) mais qui est majoritairement interprétée comme la quantité d'équipements mis en jeu dans la production, rend très difficile une telle explicitation.

Dès lors, un traitement explicite des liens entre flux monétaires et substrat matériel devient nécessaire pour examiner les perspectives de « décarbonisation » de la croissance par d'autres moyens que la combinaison d'hypothèses exogènes. Ceci revient à ajouter à l'induction du changement technique par les politiques climatiques de possibles inductions touchant à la structure de la demande finale, soit *via* l'évolution des préférences, soit par la modification des besoins (infrastructures, saturations des besoins d'équipements, etc…). Pour répondre à la volonté de décrire de façon endogène les interactions entre les déterminants C-T-L du changement structurel, il est nécessaire de prendre en compte l'induction mutuelle des modifications dans ces trois catégories. Un exemple typique de ces interactions est celui de l'effet rebond entre l'efficacité énergétique et la demande d'énergie, qui peut être important dans le domaine des transports. Pour saisir ces effets et les obstacles ou opportunités qui y sont liés, il faut donc disposer d'un cadre endogène où les consommations énergétiques résultent des évolutions conjointes et inter dépendantes des trois types de déterminants C-T-L (par exemple, toujours dans le secteur des transports, la relative inefficacité des progrès de rendement des moteurs sur les émissions du secteur dans un contexte de développement accru des infrastructures routières).

Dans un tel cadre, qui suppose la mise en place de « modèles hybrides » en quantité et en prix, il devient possible d'inscrire trois éléments cruciaux au cahier des charges de la modélisation du changement technique endogène :

- L'évolution des préférences et des comportements, des infrastructures et des équipements, des technologies, en particulier celles qui sont « incorporées » dans des équipements installés, comporte **des inerties parfois très importantes**. La prise en compte de ces inerties, à travers des générations de capital ou le suivi des infrastructures et leurs effets d'induction sur la demande est cruciale pour évaluer de façon réaliste le coût des politiques climatiques.

- Ces inerties, conjuguées au caractère endogène du changement technique, peuvent induire **des blocages dans des trajectoires non-souhaitables** (*lock-in*). Ce risque est particulièrement visible dans les domaines des transports et du bâtiment, dans lesquels les choix d'organisation urbaine et de développement des infrastructures orientent la demande finale pour chaque mode de transport, modifient l'attractivité des différentes stratégies de R&D dans chaque filière et orientent durablement le développement de certaines filières techniques, éventuellement aux dépens des autres.

- Dans ces conditions, **le rôle des politiques publiques**, tant pour fournir des signaux de long terme stables sur les orientations collectives que pour mettre en œuvre des politiques d'infrastructures adaptées, est réaffirmé. De son côté, l'outil de modélisation doit permettre à la fois de déceler les possibles effets de système qui n'auraient pas été envisagés réduisant ou catalysant l'effet de tel ou tel signal et de tester l'efficacité de « stratégies combinées » pour atteindre un objectif de stabilisation. Nous entendons ici par « stratégies combinées » des instruments d'action mixtes qui allient une valeur donnée au carbone à des instruments sectoriels spécifiques touchant à un ou plusieurs pôles du triangle C-T-L (le prix de l'immobilier ou les plans d'urbanisme par exemple).

3.2.2 Prendre en compte l'interaction entre trajectoires technologiques de long terme et frictions de court terme

Pour ce deuxième point, il faut revenir à la nature même de la croissance que les modèles décrivent. Schématiquement, celle-ci peut revêtir deux « formes » qui ne sont jamais rendues compatibles dans le paysage de la modélisation :

- **une croissance de long terme stabilisée**, pouvant correspondre à une trajectoire optimale (modèle type Ramsey-Koopmans) ou à une trajectoire résultant de comportements tous optimaux avec anticipations parfaites ;
- **une croissance heurtée à court-terme**, reproduisant des cycles d'activités, des oscillations irrégulières caractéristiques des ajustements permanents des agents économiques aux conditions économiques, avec des anticipations imparfaites et certaines inerties d'ajustement.

La très grande majorité des modèles qui traitent de l'induction du changement technique adopte ou bien une trajectoire de croissance économique prescrite (pour les modèles en équilibre partiel) ou

bien une description de la croissance stabilisée (pour les modèles macroéconomiques ou les modèles « *bottom up* » bouclés). L'argument habituellement avancé par les économistes travaillant sur les scénarios de long terme pour justifier de ne s'intéresser qu'à une croissance stabilisée est que, comme ce sont les tendances lourdes qui sont en jeu, il est inutile de s'occuper des écarts conjoncturels autour de ces tendances. Ce point de vue est en partie légitime au sens où, contrairement à une banque centrale qui doit tenir compte de la conjoncture boursière pour régler sa politique monétaire, le décalage est grand entre les aléas de cette conjoncture et les fondamentaux de l'économie qui seuls sont importants pour le problème de l'effet de serre. Mais en même temps, cette affirmation du principe de « neutralité » entre court terme et long terme ne tient que si l'on se place systématiquement sous une hypothèse d'anticipations rationnelles pour les agents économiques ou que, par un processus d'apprentissage, les erreurs d'anticipation initiales sont progressivement corrigées. Les doutes vis-à-vis de cette hypothèse, sans laquelle l'utilisation des modèles standards d'équilibre général devient problématique, ont été vite balayés par des prises de position telles que celle de Manne et Rutherford (1993) :

> "Clairvoyance is an implausible assumption, but myopia seems even worse"
> (Manne et Rutherford (1993))

Cette prise de position renvoie à un soubassement idéologique sur lequel nous ne nous étendrons pas ici, à savoir une méfiance forte vis-à-vis de toute hypothèse qui pourrait légitimer une intervention « arbitraire » des administrations dans les mécanismes de marché. Nous préférons insister sur le fait quelle n'est techniquement tenable que dans un cadre de progrès technique exogène, mais qu'elle devient très problématique dans un modèle avec progrès technique endogène. Dans un cadre de changement technique endogène, les frictions ou aléas de court terme peuvent ainsi avoir des conséquences importantes à deux niveaux :

Premièrement, l'induction du changement technique par les conditions de marché rend les trajectoires technologiques sensibles à **des effets de bifurcation,** pour lesquels la référence canonique reste Arthur (1989). Concrètement, le mécanisme est le suivant : si pour des raisons conjoncturelles une technologie *A* l'emporte à un instant donné sur une technologie *B*, elle bénéficiera d'un gain d'apprentissage qui renforcera son attractivité même si la technologie *B* possède, dans l'absolu, un potentiel de développement supérieur. Cet « aléa » peut provoquer l'apparition d'une « erreur d'anticipation » auto entretenue que seule peut corriger une information nouvelle et non controversée démontrant la supériorité de la technologie *B*, en d'autres termes, un retour à une situation d'anticipation parfaite.

Deuxièmement, l'essentiel du problème de l'évaluation du coût des politiques climatiques revient à déterminer le **coût d'un changement de trajectoire** depuis la référence vers des scénarios de stabilisation. Ceci correspond donc à un problème de transition entre deux trajectoires. Or, les modèles de croissance stabilisée ignorent par construction ces coûts de transition, ce qui peut conduire à l'apparition de deux situations opposées :

- Les coûts des politiques peuvent être sous-estimés, puisque dans un monde où les agents formulent des anticipations imparfaites et déploient leurs décisions au sein de systèmes techniques et sociaux caractérisés par une inertie importante, le même changement de

trajectoire peut entraîner des coûts économiques bien supérieurs à ceux qui sont enregistrés dans un cadre où les anticipations sont parfaites.

- Les coûts de la stabilisation peuvent être surestimés en prenant comme référence un scénario économique de « premier rang », dans lequel est ignorée, par exemple, la possibilité que se répètent au XXI^{eme} siècle, les jeux stratégiques autour du pétrole et du gaz qui ont marqué la fin du XX^{eme} siècle. En effet, en choisissant pour base de référence des scénarios optimaux, on s'interdit de discuter des multiples « bénéfices ancillaires » des politiques climatiques qui, en fournissant un signal de long terme clair, peuvent conduire à éviter ou amortir certaines frictions transitoires survenant dans le scénario de référence. L'évitement de ces frictions se doit d'être compté positivement dans l'évaluation du coût de ces politiques.

Comme viennent de le rappeler Hallegatte et *al.* (2007) dans le cas de l'analyse des dommages climatiques, les implications sur le long terme de processus de court terme ne peuvent être négligées, et constituent en fait un élément central du raisonnement sur les politiques à mener. Il nous semble donc primordial de réintégrer dans les outils de simulation les deux visions court-terme / long-terme de la croissance. Cet objectif nécessite la construction d'un cadre de modélisation autorisant des erreurs d'anticipations conduisant transitoirement à une utilisation non optimale des facteurs de production, tout en associant des boucles de rappel qui garantissent un retour sur le long terme sur un sentier de croissance stabilisé.

3.2.3 Explorer l'impact des politiques climatiques sur la croissance de long terme

L'effet potentiel des politiques climatiques sur le changement technique hors secteur énergétique reste encore peu exploré et fait l'objet d'un débat non encore résolu. L'attention s'est jusqu'à aujourd'hui portée sur les **effets d'éviction** des investissements supplémentaires consentis au titre des politiques énergétiques ou climatiques à la fois sur les investissements dans le capital productif et sur le processus d'innovation des autres secteurs. En fonction des hypothèses adoptées pour les externalités technologiques positives entre secteurs ou sur le caractère partiellement inélastique de l'offre de R&D, l'impact agrégé sur la trajectoire de croissance peut être positif ou négatif. Malgré une proximité importante des modèles macroéconomiques qui traitent de l'induction du changement technique avec les nouvelles théories de la croissance, rares sont ceux qui adoptent une évolution endogène de la productivité des facteurs de production non énergétiques (*cf.* section 2.3.1). De plus, ces modèles représentent l'activité économique à un niveau très agrégé qui ne permet pas de capter les effets de substitution induits par les politiques climatiques sur le contenu de la demande finale. Lorsqu'il est abordé, **l'impact des politiques climatiques sur l'évolution de la productivité des facteurs** ne prend en compte le problème que du côté de l'offre d'innovation et néglige ainsi les possibles déformations induites des systèmes de demande aboutissant à une réorientation des efforts de R&D entre les secteurs productifs non énergétiques. A titre d'exemple, une politique climatique ambitieuse pourrait induire une dématérialisation progressive de la demande finale des ménages et orienter les investissements d'innovation en faveur

de l'offre de services, accélérant ainsi les gains de productivité dans ces secteurs. Notre travail se propose d'effectuer une première exploration dans ce sens, en introduisant de façon stylisée un impact possible des politiques climatiques sur les trajectoires sectorielles de productivité des facteurs.

Conclusion

Les problèmes que nous nous posons pour cette thèse définissent le cahier des charges de notre architecture de modélisation. Cette architecture doit s'appuyer sur la garantie de cohérence fournie par le cadre théorique de l'équilibre général mais doit aussi démontrer sa capacité à **hybrider** l'analyse économique avec des informations techniques sectorielles. Les décisions d'**investissement** des agents (choix des équipements de production et des infrastructures) doivent être décrites avec précision et intégrer des **choix technologiques** explicites. De même, l'architecture de modélisation doit fournir une description des mécanismes spécifiques à la formation de la **demande finale des ménages** pour que la structure de celle-ci résulte de l'interaction entre distribution des revenus, contenu technologique des équipements et infrastructures disponibles.
Un tel cahier des charges nécessite de créer un nouveau modèle qui diffère dans son architecture des modèles d'équilibre général déjà existants. Nous consacrons les deux chapitres suivants à décrire les choix méthodologiques et à fournir les justifications théoriques qui sont au fondement de la construction de ce modèle. Ces deux chapitres nous permettent aussi d'en donner une description technique complète.

Bibliographie

Aghion, P., Howitt P., 1998, "Endogenous Growth Theory". Cambridge, MA: MIT Press, 684 p.

Arrow K.J. , 1962, "The Economic Implications of Learning-by-Doing"*, Review of Economics*, 29, pp. 155-173.

Arthur, B., 1989, "Competing Technologies, Increasing Returns, and Lock-In by Historical Small Events". *Economic Journal* 99, pp 116-131.

Azar C., Dowlatabadi H. 1999. "A Review of Technical Change in Assessments of Climate Policy", *Annual Review of Energy and the Environment* 24: pp 513–44.

Barker, T., I. Bashmakov, A. Alharthi, M. Amann, L. Cifuentes, J. Drexhage, M. Duan, O. Edenhofer, B. Flannery, M. Grubb, M. Hoogwijk, F. I. Ibitoye, C. J. Jepma, W.A. Pizer, K. Yamaji, 2007, "Mitigation from a cross-sectoral perspective". *In Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Barreto L., Kypreos S., 1999, "Technological Learning in Energy Models: Experience and Scenario Analysis with MARKAL and the ERIS Model Prototype", *PSI Bericht 99-08*. Paul Scherrer Institute, Villingen, Switzerland.

Bernard A. L., Vielle M., 1998, « GEMINI-E3 un modèle d'équilibre général national-international économique, énergétique et environnemental », *Économie et Prévision*, n°36, pp. 1-48.

Böhringer, C., Löschel, A., 2002, "Economic Impacts of Carbon Abatement Strategies", in: Böhringer C., Finus M., Vogt C. (Eds.), *Controlling Global Warming-Perspectives from Economics, Game Theory and Public Choice* (New Horizons in Environmental Economics). Edward Elgar, Cheltenham, pp. 98-172.

Bosetti V., Carraro C, Galeotti M., 2006, "The Dynamics of Carbon and Energy Intensity in a Model of Endogenous Technical Change", in Grubb, M., Carraro, C., Schellnuber, J., eds., "Endogenous Technological Change and the Economics of Atmospheric Stabilisation", *The Energy Journal*, Special Issue: pp 191-205

Boston Consulting Group, 1968, *Perspectives on Experience*. Boston Consulting Group Inc.

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

Burniaux J.M., Martin J.P, Nicoletti G, Oliveira, GREEN J. , 1992, "A Multi-Region Dynamic General Equilibrium Model for Quantifying the Costs of Curbing CO2 Emissions: A Technical Manual", *Working Paper 116, Economics and Statistics Department*, OECD, Paris.

Cass, D, 1965, "Optimum growth in an aggregative model of capital accumulation," *Review of Economic Studies*, 32, pp. 233–240.

Clarke, L., Weyant, J., Birky, A., 2006, “On the sources of technological change: assessing the evidence”, Energy Economics (28), pp. 579-595.

Clarke, L., Weyant, J., Edmonds, J., 2008, “On the sources of technological change: What do the models assume”, *Energy Economics*, Volume 30, Issue 2, March 2008, pp. 409-424.

Domar, E. D., 1946, “Capital Expansion, Rate of Growth, and Employment”, *Econometrica*, 14, pp. 137-147.

Dowlatabadi H., Oravetz, M., 2006, "Understanding Trends in Energy Intensity: a simple model of technical change." *Energy Policy*, 34(17).

Dutton J., Thomas A., 1984. “Treating progress functions as a managerial opportunity”. *The Academy of Management Review* 9 (2), pp 235–247.

Edenhofer E., Lessmann K., Bauer N., 2006, “Mitigation strategies and costs of climate protection : The effects of ETC in the hybrid model MIND”, in Grubb, M., Carraro, C., Schellnuber, J., eds. Endogenous Technological Change and the Economics of Atmospheric Stabilisation. *The Energy Journal*, Special Issue: pp. 207-222

Fishbone L.G., Giesen G.A., Goldstein H.A., Hymen H.A., 1983, “User’s Guide for MARKAL (BNL/KFA Version 2.0).” *BNL-46319*, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York.

Fisher, B.S., N. Nakicenovic, K. Alfsen, J. Corfee Morlot, F. de la Chesnaye, J.-Ch. Hourcade, K. Jiang, M. Kainuma, E. La Rovere, A. Matysek, A. Rana, K. Riahi, R. Richels, S. Rose, D. van Vuuren, R. Warren, 2007, “Issues related to mitigation in the long term context”, *In Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Inter-governmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

Gerlagh R., 2006, “ITC in a global growth-climate model with CCS. The value of induced technical change for climate stabilization”, *The Energy Journal* (Special issue on *Endogenous Technological Change and the Economics of Atmospheric Stabilisation*), pp 55–72.

GIEC, 1996, “Climate change 1995. Economic and Social Dimensions of Climate Change”, Contribution of Working Group III to the *Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.

Gillingham , K., T., Newell , R., G. , Pizer , W., A., 2007. “Modeling Endogenous Technological Change for Climate Policy Analysis”, Discussion Papers *Resources For the Future*.

Goolsbee A., 1998, “Does Government R&D Policy mainly Benefit Scientists and Engineers?”, *American Economic Review* 88 (2), 298–302.

Goulder L., Schneider S., 1999, “Induced Technological Change and the Attractiveness of CO_2 Abatement Policies”, *Energy Economics*, 21, pp,211-253.

Griliches Z., 1992, “The Search for R&D Spillovers”, *Scandinavian Journal of Economics,* 94, pp 29–47. Supplement.

Grubb, M., Chapuis, T., Ha Duong, M., 1995, "The economics of changing course, implications of adaptability and inertia for optimal climate policy", *Energy Policy* 23 4/5, pp. 417-431.

Grubb M., Köhler J., Anderson D., 2002, "Induced technical change in energy and environmental modeling: analytic approaches and policy implications", *Annual Review of Energy and the Environment,* 27, pp 271–308.

Grübler A., Nakićenović N., Nordhaus W. D. (Eds.), 2002, *Technological Change and the Environment,* Washington, DC, Resources for the Future.

Ha-Duong M., Grubb M., Hourcade J.-C., 1997, "Influence of Socio-Economic Inertia and Uncertainty on Optimal CO_2 Emission Abatement", *Nature,* 390, pp 270-73.

Hallegatte, S., Hourcade, J.-C., Dumas, P., 2007, "Why economic dynamics matter in assessing climate change damages: Illustration on extreme events", *Ecological Economics* 62 (2), pp. 330-340.

Halsnæs, K., P. Shukla, D. Ahuja, G. Akumu, R. Beale, J. Edmonds, C. Gollier, A. Grübler, M. Ha Duong, A. Markandya, M. McFarland, E. Nikitina, T. Sugiyama, A. Villavicencio, J. Zou, 2007, "Framing issues", In *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

Hanson, D., 1999, "A Framework for Economic Impact Analysis and Industry Growth Assessment: Description of the AMIGA System", *Policy and Economic Analysis Group*, Decision and Information Sciences Division, Argonne National Laboratory, Argonne, IL.

Harrod, R. F., 1939, "An Essay on Dynamic Theory", *Economic Journal,* 49, pp. 14-33.

Hicks, J.R., 1932, "The Theory of Wages". *Macmillan*, London.

Hourcade J.C.,1993, "Modelling long-run scenarios. Methodology lessons from a prospective study on a low CO2 intensive country", *Energy Policy* 21(3): pp 309-326.

Hourcade, J.C., P.R. Shukla, 2001, "Global, regional, and national costs and ancillary benefits of mitigation", in: B. Metz, O. Davidson, R. Swart, J. Pan (Eds.), *Climate Change 2001: Mitigation*, Cambridge University Press, Cambridge, MA, 2001.

Hourcade J.C., Jaccard M., Bataille C., Ghersi, F.,2006, "Introduction to the Special Issue of the energy journal*"*, *The Energy Journal* special issue : *Hybrid modelling of energy environment policies : reconciling bottom-up and top-down*.

Jaccard, M., Bailie, A., Nyboer, J., 1996, "CO2 emission reduction costs in the residential sector: Behavioral parameters in a bottom-up simulation model", *The Energy Journal* 17 4, pp. 107-134.

Jaccard M., 2005, "Hybrid Energy-Economy Models and Endogenous Technological Change", in eds. Loulou R., Waaub JP., Zaccour G., *Energy and Environment,* Springer, pp 81-110.

Jakeman G., Hanslow K., Hinchy M., Fisher B.S., Woffenden K.,2004, "Induced innovations and climate change policy", *Energy Economics*, vol. 26, n°6, pp.937-960.

Köhler J., Grubb M., Popp D., Edenhofer O. ,2006, "The Transition to Endogenous Technical Change in Climate-Economy Models". in Grubb, M., Carraro, C., Schellnuber, J., eds. Endogenous Technological Change and the Economics of Atmospheric Stabilisation. *The Energy Journal*, Special Issue.

Koopmans, T., C., 1965, "On the concept of optimal economic growth," *in (Study Week on the) Econometric Approach to Development Planning*, chap. 4, pp. 225–87, North-Holland Publishing Co., Amsterdam.

Kouvaritakis N., Soria A., Isoard S. ,2000, "Endogenous Learning in World Post-Kyoto Scenarios: Application of the POLES Model under Adaptive Expectations" , *International Journal of Global Energy Issues*, Vol. 14, No. 1-4, pp 222-248.

Lecocq F., Hourcade J.C., Ha-Duong M.,1998, "Decision making under uncertainty and inertia constraints : sectoral implications of the when flexibility", *Energy Economics* 20(5/6), pp 539-555.

LEPII-EPE, 2006, "The POLES model", *Institut d'Économie et de Politique de l'Énergie*, Grenoble, France, 12 pp. http://webu2.upmf-grenoble.fr/iepe/textes/POLES12p_Jan06.pdf (accédé le 12/04/2008)

Loschel A., 2002, "Technological Change in Economic Models of Environmental Policy: a Survey", *Ecological Economics*, 43, pp105–126.

Lucas, R., 1988. "On the Mechanics of Economic Development". *Journal of Monetary Economics* 100: 223–251.

Manne, A., Wene C.-O.,1992, "MARKAL-MACRO: A Linked Model for Energy-Economy Analysis", *Bnl-47161 report*, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York.

McDonald, A., Schrattenholzer, L., 2001, "Learning Rates for Energy Technologies". *Energy Policy* 29(4), pp 255-261.

McFarland J. R., Reilly J. M., Herzog H. J., 2004, "Representing Energy Technologies in Top-Down Economic Models using Bottom-Up Information", *Energy Economics*, Vol 26, Issue 4, July, pp 685-707.

Messner S., 1997, "Endogenised Technological Learning in an Energy System Model", *Journal of Evolutionary Economics*, 7, pp 291-313.

Messner, S., Schrattenholzer, L., 2000, "MESSAGE–MACRO: linking an energy supply model with a macroeconomic module and solving it iteratively", *Energy* 25, pp. 267-282.

Nordhaus, W.D., 1973. "The allocation of energy resources.", *Brookings Papers on Economic Activity 3*, pp. 529–570.

Nordhaus William, 1994, "Managing the Global Commons: The Economics of Climate Change", Cambridge, MA: MIT Press.

Nordhaus W., 1999, "Modeling induced innovation in climate change policy", Paper for workshop *Induced Technological Change and the Environment* June 21_22, 1999, IIASA, Laxenburg.

Nordhaus, W., 2002. "Modeling Induced Innovation in Climate Change Policy". In *Technological Change and the Environment*, edited by A. Grubler, N. Nakicenovic and W. Nordhaus. Washington, DC: Resources for the Future Press. pp. 182-209

Paltsev, S., Reilly J., Jacoby H., Eckaux R., McFarland J., Sarofim M., Asasoorian M., Babiker M., 2005, "The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model: Version 4", Report no. 125. *Joint Program on the Science and Policy of Global Change*, MIT, Cambridge, MA.

Popp D., 2002, "Induced innovation and energy prices", *American Economic Review* 92 (1), pp 160–180.

Popp D., 2004a, "ENTICE: endogenous technological change in the DICE model of global warming", *Journal of Environmental Economics and Management* 48, pp 742–768.

Popp,D., 2004b., "R&D Subsidies and Climate Policy: Is there a "Free Lunch"", *NBER Working Paper* 10880.

Popp D., 2006, "Comparison of Climate Policies in the ENTICE-BR Model", in Grubb, M., Carraro, C., Schellnuber, J., eds. Endogenous Technological Change and the Economics of Atmospheric Stabilisation. *The Energy Journal*, Special Issue: pp. 163-174.

Ramsey, F., 1928, "A Mathematical Theory of Saving", *Economic journal* 38, p. 543-559.

Rao S., Keppo I., Riahi K., 2006, "Importance of technological change and spillovers in long term climate policy", in Grubb, M., Carraro, C., Schellnuber, J., eds. Endogenous Technological Change and the Economics of Atmospheric Stabilisation. *The Energy Journal*, Special Issue: pp. 55–72.

Romer, Paul. 1990, "Endogenous Technological Change", *Journal of Political Economy* 98,5, pp S71–S102.

Ruttan, V., W., 2002, "Sources of Technical Change: Induced Innovation, Evolutionary Theory, and Path Dependence", in *Technological Change and the Environment*, Grubler A., Nakicenovic N., Nordhaus W. D. (eds.), Washington, DC: Resources for the Future, pp. 320-363

Sano F., Akimoto K., Homma T., Tomoda T. ,2006, "Analysis of Technological Portfolios for CO_2 Stabilizations and Effects of Technological Changes", in Grubb, M., Carraro, C., Schellnuber, J., eds. Endogenous Technological Change and the Economics of Atmospheric Stabilisation. *The Energy Journal*, Special Issue.

Schumpeter J., 1942, "Capitalism, Socialism and Democracy", Harper, New York.

Shukla P.R., Ghosh, D., Garg, A., 2003, "Future Energy Trends and GHG Emissions for India", in Toman M.A, Charvaraty U., Gupta S. (eds.) *Global Climate Change: Perspectives on Economics and Policy from a Developing Country*, Resources for the Future, Washington DC, U.S.A. pp 11-35.

Solow, R., M., 1956, "A Contribution to the theory of economic growth", *Quarterly Journal of Economics* 70(1), p.65-94.

Solow, R., M., 1957, "Technical change and the aggregate production function", In *Business Cycle Theory*, ed. FE Kydland, pp. 38-46.

Solow, R., M., 1959, “Investment and Technological Progress”, in: Arrow, K., Karlin, S., Suppes, P. (Eds.), *Mathematical Methods in the Social Sciences*, Stanford University Press, Stanford, CA, pp. 89-104.

Solow, R., M., 1988, “Growth theory and after”, *The American Economic Review,* 78:3, pp 307-317.

Van Meijl H., van Tongeren F., 1999, “Endogenous Technology Spillovers and Biased Technical Change in the GTAP Model”., *GTAP Technical Paper 15*.

Wene C.-O., 2000, “Experience Curves for Energy Technology Policy”, OECD/IEA, Paris.

Weyant J.P., Olavson, T. ,1999, “Issues in Modelling Induced Technological Change in energy, Environmental, and Climate Policy”, *Environmental Modelling and Assessment*, 4, pp 67-85.

Wigley T. M. L., Richels R., Edmonds J. A., 1996, “Economic and Environmental Choices in Stabilization of Atmospheric CO2 Concentrations”, *Nature* 369(18 January): pp 240-243

Wing S., I., 2006, “Representing induced technological change in models for climate policy analysis”, *Energy Economics*, Volume 28, Issues 5-6, Pages 539-562

Wright T.P.,1936, “Factors Affecting the Costs of Airplanes”, *Journal of the Aeronautical Sciences*, 3 February, pp. 122-128.

Chapitre 2

L’architecture du modèle IMACLIM-R

Table des matières

1 CHOIX METHODOLOGIQUES ET STRUCTURE DU MODELE 61

1.1 UNE VISION DUALE DE L'ECONOMIE POUR FACILITER LE DIALOGUE ENTRE LES INGENIEURS ET LES ECONOMISTES 61
1.2 UN MOTEUR DE CROISSANCE QUI PERMET DES ECARTS TRANSITOIRES ENTRE LA CROISSANCE POTENTIELLE ET LA CROISSANCE REELLE 65

2 DONNÉES 67

3 EQUILIBRE STATIQUE 70

3.1 DEMANDE DES MENAGES EN BIENS, SERVICES ET ENERGIE 70
3.1.1 Revenu et épargne 70
3.1.2 Fonction d'utilité 71
3.1.3 Programme de maximisation 72
3.2 CONTRAINTES DE PRODUCTION ET COURBES D'OFFRE 73
3.3 ADMINISTRATIONS 75
3.4 MARCHE DU TRAVAIL 76
3.5 FLUX DE CAPITAUX ET INVESTISSEMENTS 77
3.5.1 Allocation régionale et internationale de l'épargne 77
3.5.2 Achat de biens d'équipement 78
3.6 MARCHES DES BIENS ET COMMERCE INTERNATIONAL 79
3.7 CONTRAINTES D'EQUILIBRE SUR LES FLUX PHYSIQUES 80
3.8 CHOIX D'UN NUMERAIRE 81
3.9 ÉMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE ET TAXE CARBONE 81
3.9.1 Comptabilisation des émissions 81
3.9.2 Evolution des coefficients d'émissions 81
3.9.3 Taxe carbone 82

4 LIENS DYNAMIQUES : MOTEUR DE CROISSANCE ET CHANGEMENT TECHNIQUE 82

4.1 LE MOTEUR DE CROISSANCE : DEMOGRAPHIE, PRODUCTIVITE ET ACCUMULATION DE CAPITAL 83
4.1.1 Evolution démographique 83
4.1.2 Productivité du travail 86
4.1.3 Formation de l'investissement et accumulation du capital 90
4.2 CHANGEMENT STRUCTUREL 92

CONCLUSION 94

BIBLIOGRAPHIE 97

Le cahier des charges défini dans le chapitre précédent est à l'origine de notre travail dans le développement du modèle IMACLIM-R. Ce modèle fait partie de la famille des modèles IMACLIM qui est développée au CIRED depuis plus d'une décennie. Le modèle de projection statique IMACLIM-S a d'abord permis d'explorer les possibilités d'une architecture orientée vers l'intégration des données technico-économiques dans un cadre d'équilibre général statique (de Hourcade, 1993 à Ghersi et *al.*, 2006). Ce modèle est conçu pour mener des analyses de *statique comparative* (Samuelson, 1962) : celles-ci consistent à comparer des projections macro-énergétiques à une date *t+n donnée (par ex. 2030), chaque* projection étant l'image d'un régime de croissance ayant reçu entre *t* et *t+n* des stimuli économiques *différents* (par exemple avec ou sans taxe carbone croissante). Un tel outil présente l'avantage de garantir à la fois une grande souplesse d'utilisation et une forte cohérence macro-énergétique, mais ne permet pas de décrire les sentiers de transition vers des régimes stabilisés, sentiers dont la compréhension est primordiale pour la décision publique et pour la mise en place des mesures de transition. C'est pour éclairer ces dynamiques transitoires qu'a été entreprise il y a cinq ans la construction d'une version récursive de ce modèle, dite IMACLIM-R dont l'architecture est présentée dans ce chapitre.

La première partie décrit les choix théoriques et méthodologiques qui sous-tendent la stratégie de modélisation adoptée : le modèle est fondé sur l'articulation récursive d'équilibres statiques annuels et de modules dynamiques entre ces équilibres statiques. La deuxième partie détaille les choix de modélisation effectués dans l'équilibre statique. Enfin, la troisième partie décrit le fonctionnement général des modules dynamiques et en particulier le moteur de croissance. Le chapitre suivant est dédié à une description technique complète des différents modules dynamiques sectoriels. Ceci nous permet de revenir plus précisément sur les modalités de l'intégration d'informations techniques sectorielles dans un cadre d'équilibre général.

1 Choix méthodologiques et structure du modèle

1.1 Une vision duale de l'économie pour faciliter le dialogue entre les ingénieurs et les économistes

IMACLIM-R repose sur une description explicite de l'économie à la fois en valeurs monétaires et en quantités physiques, les deux étant liées par le jeu des prix relatifs. Ceci fait directement écho à l'intuition sous-jacente à l'axiomatique de l'équilibre général élaborée par Arrow et Debreu (Arrow et Debreu, 1954). Grâce à cette représentation de variables physiques explicites (et pas « subrogées » comme dans les modèles macro-économiques compacts), le modèle fournit une vision duale de l'économie permettant de vérifier si l'économie projetée repose sur une réalité technique plausible et à l'inverse si le système technique projeté s'insère dans un contexte économique cohérent, notamment avec le système des prix relatifs interdépendants. Les variables physiques du modèle sont en fait un support essentiel du dialogue entre les modélisateurs macroéconomiques et les ingénieurs sectoriels parce qu'elles permettent de transcrire explicitement des dires d'experts, qu'ils portent sur les économies d'échelle, sur les mécanismes d'apprentissage ou sur les asymptotes de saturation du progrès technique. Nous disposons ainsi des variables pertinentes pour intégrer des connaissances empiriques sur l'efficacité des instruments

économiques, les imperfections de marché, les contraintes institutionnelles et la rationalité limitée des comportements.

Au final, l'enjeu est de représenter de façon *réaliste* comment la demande finale et les systèmes techniques sont transformés par les signaux économiques et les politiques publiques, surtout dans des scénarios de bifurcation importante par rapport à une trajectoire de référence.

Dans ce but, un point de passage clé réside dans l'abandon des fonctions de production conventionnelles KLE ou KLEM (Hourcade 1993, Ghersi et Hourcade 2006). Celles-ci sont généralement utilisées dans les modèles macroéconomiques parce qu'elles sont censées reproduire de manière agrégée l'ensemble des technologies disponibles et des contraintes techniques qui s'appliquent sur une économie (*cf.* Berndt et Wood (1975) et Jorgenson (1981)). Ces fonctions reposent sur le cadre axiomatique standard, mais elles produisent une vision duale de l'économie (prix – quantités) qui n'est tenable qu'au strict voisinage d'un sentier d'équilibre : sur chaque point de ce sentier les prix sont égaux aux multiplicateurs de Lagrange associés aux contraintes physiques dans l'espace primal, et les quantités (facteurs de production, biens de consommation) sont celles qui permettent d'égaliser les productivités marginales des facteurs avec ces prix. Au voisinage de chaque équilibre, l'univers des possibilités techniques à court terme, qu'un ingénieur décrirait par un ensemble discret de technologies disponibles, peut être réduit à une forme fonctionnelle mathématique agrégée continue (Cobb-Douglass, Elasticité de substitution constante, translog etc …). Pour la modélisation, ces fonctions sont très pratiques, ne serait-ce que par le fait que leurs caractéristiques sont données par tout compendium de mathématiques pour économistes (*cf.* Chung, 1994, par exemple). Or, récemment, une analyse de plus de mille études économétriques sur la substitution capital-energie menait Frondel et Schmit (2002) à remettre en question la robustesse empirique de telles représentations :

> *« Inferences obtained from previous empirical analyses appear to be largely an artefact of cost shares and have little to do with statistical inference about technology relationship »*
> *(in Frondel and Schmidt, 2002, p.72).*

En fait, ce résultat ne devrait pas surprendre ceux qui se souviennent du débat sur le retour des techniques entre les deux Cambridge dans les années 60 et 70 (*cf.* Cohen et Harcourt (2003) pour une analyse historique). La critique de l'édifice néoclassique par les économistes de Cambridge (G.B.) visait notamment à nier que le ratio entre les salaires et les profits est directement lié à la productivité marginale des facteurs, ce qui en fait une donnée « naturelle » peu contestable. Le caractère âpre et quelque peu idéologique de ce débat a quelquefois masqué son fond technique, à savoir que l'interprétation de la fonction de production néoclassique comme une fonction physique n'est tenable que dans un monde où les technologies se caractérisent par la même intensité en capital et en travail, c'est-à-dire en fait, un monde à un seul bien. Ce point précis est très clairement confirmé dans l'avertissement de R. Solow (1988), lors de son discours de réception du prix Nobel, qui rappelle que la fonction de production agrégée qu'il a utilisée dans ses articles de 1956 et 1957 était une astuce utile pour démontrer que les croissances instables « en fil du rasoir » des modèles post keynésiens (modèle Harrod-Domar ; *cf.* Harrod, 1939 ; Domar, 1946) pouvaient se transformer en croissances équilibrées dès lors que la fonction de production, plutôt que d'être à coefficients fixes, comportait quelques flexibilités. Et, portant un regard en arrière sur sa contribution à la théorie néoclassique de la croissance et à son usage d'une fonction de production agrégée flexible, R. Solow se dégage de toute responsabilité sur les abus de cette « recette » facile de modélisation :

« this 'wrinkle' is acceptable only at an aggregate level (for specific purposes) and implies to be cautious about the interpretation of the macroeconomic productions functions as referring to a specific technical content »
(in Solow, 1988, p. 313).

Autrement dit, le problème est que la représentation de la technologie passe, dans ce cas, par un recours au lemme de Sheppard, qui permet de paramétrer des fonctions de production, censées décrire les caractéristiques *techniques* des technologies disponibles, à partir de la structure *monétaire* des coûts de production sur une année de référence. Or, le domaine à l'intérieur duquel cet usage systématique du « théorème de l'enveloppe » fournit une approximation robuste des ensembles techniques réels est très limité par :

- La fragilité de l'hypothèse selon laquelle les données économiques, à chaque point du temps, résultent d'une réponse optimale au vecteur des prix courants[4] ;
- Le manque de réalisme technologique d'une élasticité de substitution constante sur l'espace entier des prix relatifs, des niveaux de production et des horizons de temps étudiés pour les problèmes de développement durable. Et comme le notent McFarland et *al.* (2004), dans des fonctions KLE où l'énergie est incorporée, on n'a par exemple aucune garantie que, avec des prix très élevés de l'énergie et des fonctions de production à élasticité constante, on ne viole pas les lois de la thermodynamique.

La solution retenue dans IMACLIM-R est fondée sur l'intuition qu'il est difficile de trouver des fonctions mathématiquement tractables dont les propriétés permettent de représenter, sur un siècle, des écarts très importants vis-à-vis de l'équilibre de référence. En d'autres termes, les fonctions usuelles risquent d'être non seulement *trop flexibles* à court terme, mais aussi *trop peu flexibles* sur le long terme pour prendre en compte différents scénarios du changement structurel, tels qu'ils résultent de l'interaction entre les styles de consommation, les choix technologiques et les schémas de localisation. IMACLIM-R évite donc le recours à de telles fonctions ; à la place nous avons choisi une structure récursive où l'évolution des structures de coûts de production pour chaque secteur dépend de modules technologiques sectoriels, intercalés entre les équilibres statiques successifs :

- **Au sein d'un équilibre statique annuel**, les technologies sont supposées fixes, car elles sont encapsulées dans les équipements et capacités de production installés ; la flexibilité technique est réduite au minimum ; les leviers d'adaptation des producteurs résident dans le choix des taux d'utilisation des équipements et capacités installés. Mathématiquement, la rigidité des techniques installées se traduit par des coefficients techniques fixes, autrement dit tous les facteurs de production sont complémentaires. La résolution de chaque équilibre statique fournit un « cliché » de l'économie à la date considérée : un ensemble de prix relatifs, de niveaux de production, de flux physiques ; les taux de profit pour chaque secteur et l'allocation des investissements entre les secteurs.

[4] « *Total-factor-productivity calculations require not only that market prices can serve as a rough-and-ready approximation of marginal products, but that aggregation does not hopelessly distort these relationships* » (in Solow, 1988, p. 314)

- **Entre chaque équilibre statique, des modules dynamiques** représentent les évolutions démographiques, l'accumulation du capital, et les choix technologiques des différents agents de l'économie, à travers des formes réduites de modèles sectoriels détaillés. Ces formes réduites calculent la réaction des systèmes techniques, en fonction des paramètres économiques obtenus dans les équilibres statiques précédents et des anticipations qu'ils permettent de formuler. Ils renvoient ensuite ces informations au module statique sous la forme de nouveaux coefficients techniques pour calculer l'équilibre suivant. A chaque date, les agents peuvent choisir de nouveaux équipements de façon flexible parmi un portefeuille de technologies disponibles ; ces choix induisent une modification à la marge des coefficients *input-output* et de la productivité globale, en tenant compte des technologies déjà incorporées dans les équipements existants, qui résultent des choix techniques passés. Ceci revient à une fonction de production « *putty – clay* »[5], qui permet de représenter l'inertie des systèmes techniques. De plus, le caractère récursif du modèle et le choix d'une résolution année par année permettent de tenir compte du fait que les économies ne réagissent pas seulement aux tendances moyennes des signaux économiques mais aussi à leur volatilité.

Cette logique d'interaction entre un équilibre général statique et des modules technologiques sectoriels permet d'instaurer une hybridation étroite entre les visions *bottom-up* et *top-down* des univers techniques (Figure 2).

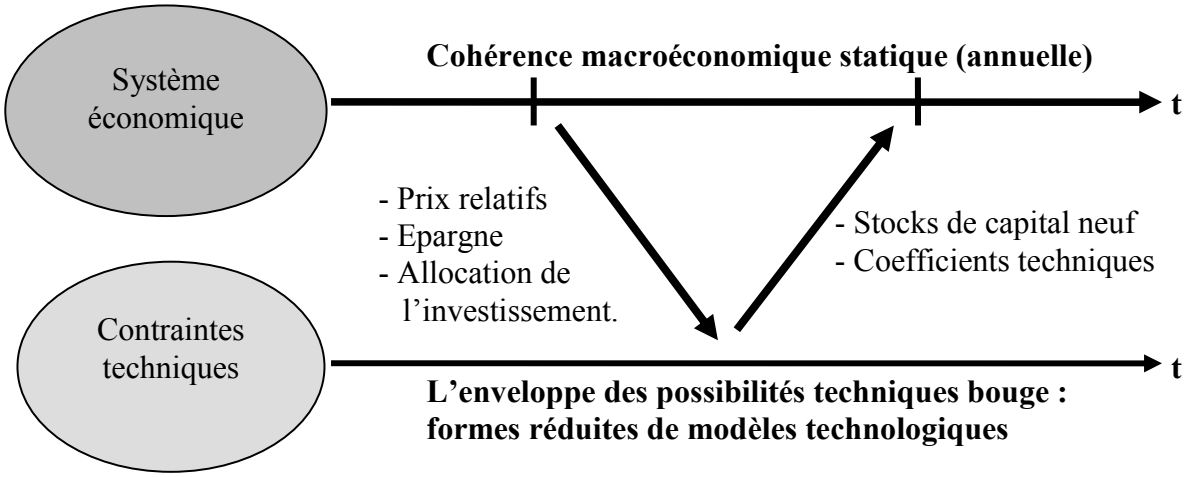


Figure 2: Un dialogue itératif « *top-down / bottom-up* »

La structure modulaire du modèle (Figure 3) permet (i) de conserver un niveau d'agrégation assez élevé et maîtrisable dans l'équilibre statique annuel, (ii) d'informer l'évolution des coefficients techniques de l'équilibre statique par des fonctions de réactions sectorielles « *bottom-up* » (transport, énergie, résidentiel, ressources fossiles). Ces fonctions de réaction capturent, sous une

[5] Ce faisant nous négligeons les possibilités de « reconversion » (*retrofitting*) du capital existant d'une technologie à une autre, ou d'un secteur à un autre. Cela peut se modifier facilement dans les modules décrivant la dynamique du capital. Dans la version actuelle du modèle, nous avons ainsi choisi de représenter la borne haute de l'inertie.

forme compacte[6], les déterminants tangibles des changements techniques et structurels ; elles sont calibrées pour approximer la réponse de modèles technico-économiques à un ensemble de paramètres économiques (signaux prix, investissements). Le niveau d'agrégation sectorielle et le degré de compacité des modules dynamiques peuvent ainsi être adaptés selon l'objectif de l'exercice de modélisation. Cette flexibilité est similaire à celle qui est développée dans l'architecture O[bj]ECTS, portée par l'équipe du Batelle Institute (Kim et *al.*, 2006), à partir des modèles SGM et MiniCAM. Un avantage de cette méthode de modélisation est de pouvoir tester facilement l'impact de diverses hypothèses faites sur les routines de décision des agents et sur les mécanismes de formation de leurs anticipations (parfaites ou imparfaites, avec de l'aversion au risque, etc.).

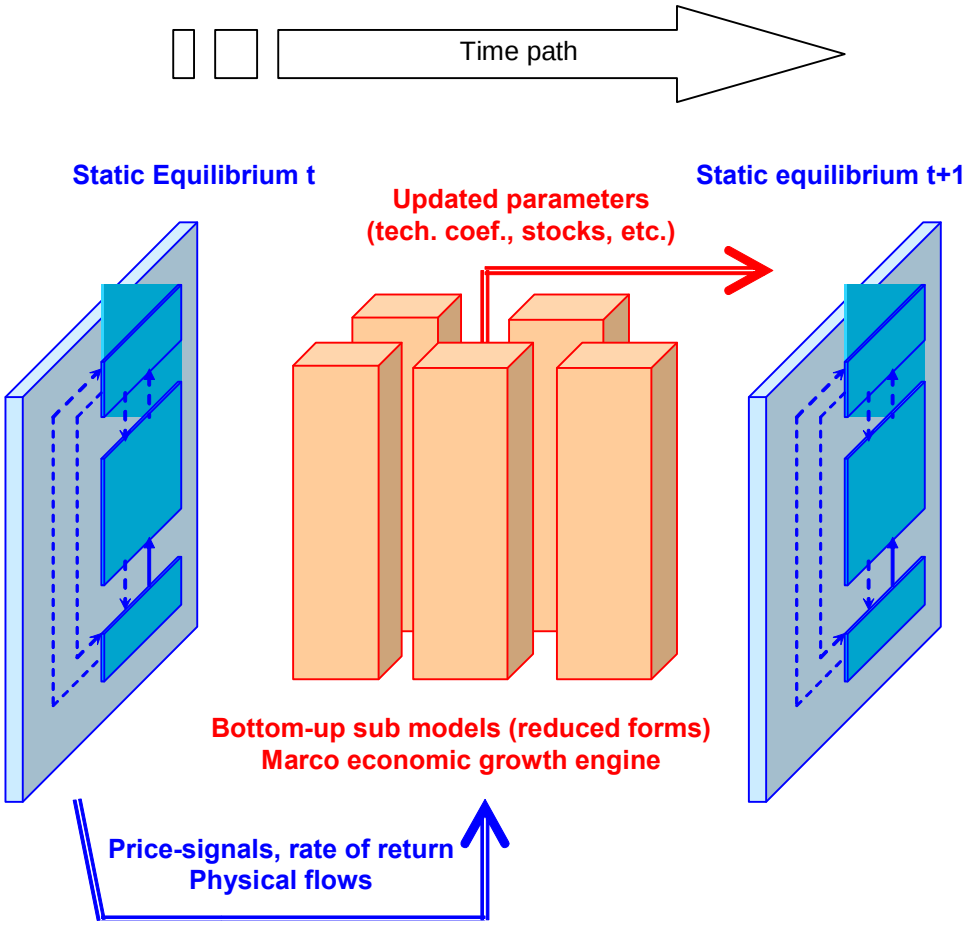


Figure 3 : Architecture récursive d'IMACLIM-R

1.2 Un moteur de croissance qui permet des écarts transitoires entre la croissance potentielle et la croissance réelle

[6] Construire ces fonctions de réaction compactes nous évite de tomber dans le piège des structures en équilibre général qui décrivent autant de catégories de produits que les modélisations technico-économiques des systèmes énergétiques.

Dans IMACLIM-R, la croissance est représentée à travers une succession chronologique d'équilibres statiques. Cette représentation itérative permet de modéliser aussi bien le moteur de croissance à long terme que certaines fluctuations de croissance à court terme. A long terme, suivant les enseignements des travaux de comptabilité de la croissance, la croissance est induite par l'interaction entre des trajectoires démographiques exogènes et des scénarios d'évolution de la productivité du travail, qui reposent sur des hypothèses de rattrapage entre les régions. Population active, population totale et productivité du travail sont des paramètres de l'équilibre statique dont l'évolution progressive conditionne la croissance à long terme. Mais la croissance réelle, *résultat* de la résolution des équilibres successifs, dépend aussi des montants d'investissement net disponible, de l'allocation des investissements entre les secteurs et de l'impact des cumuls d'investissement sur le changement technique et la productivité.

Une spécificité du modèle est d'autoriser des déséquilibres dus à des écarts entre les anticipations formulées et l'état réel de l'économie ; cette spécificité permet de capturer les coûts de transition après une décision politique ou un choc exogène. Retenir de tels mécanismes de déséquilibres endogènes revient à suivre le conseil de R. Solow d'accorder une plus grande attention aux chemins de transition, comme il l'affirmait au détour d'une critique de la modélisation actuelle des cycles économiques :

> *« What we used to call business cycles – or at least booms and recessions – are now to be interpreted as optimal blips in optimal paths in response to random variations in productivity and the desire for leisure. I find none of this convincing. The markets for goods and labor look to me like imperfect pieces of social machinery with important institutional peculiarities. They do not seem to behave at all like transparent and frictionless mechanisms for converting the consumption and leisure desires of households into production and employment decisions».*
> *(Solow, 1988, p310 et 311).*

Dans IMACLIM-R, nous nous rapprochons ainsi d'une dynamique « à la Kalecki », c'est-à-dire que les décisions d'investissement sont déterminées par la maximisation du profit futur, lui-même calculé à partir d'anticipations imparfaites, sur des marchés non parfaitement compétitifs. Les déséquilibres sont générés de façon endogène par *l'inertie* de l'adaptation des systèmes à des conditions économiques changeantes, inertie qui freine un retour automatique et sans coût à un équilibre stationnaire. Comme à court terme la flexibilité principale disponible réside dans le choix des taux d'utilisation des capacités, le modèle peut représenter des excès ou des pénuries en facteurs de production, des situations de sous-emploi et des taux de profitabilité inégaux entre les secteurs. Nous avons été encouragés à poursuivre dans cette direction par la remarque de J. Stiglitz qui remarquait à propos de certains résultats des modèles de croissance incorporant **des coûts d'ajustement** :

> *« [They] have some semblance to those of the model that Kaldor (1957, 1961) and Kalecki (1939) attempted to construct [which] […] may be closer to the mark than the allegedly 'theoretically correct' neoclassical theory »*
> *(Stiglitz 1990, pp 57-58).*

Les capacités de calcul actuelles nous permettent de développer, grâce à cette architecture, un modèle (i) qui n'a pas les défauts de la croissance sur le « fil du rasoir » des modèles à la « Harrod-Domar » - ceux-ci représentaient des scénarios en équilibre instable et quelque peu irréalistes et (ii)

qui ne nécessite pas le recours à « l'astuce » (Solow, 1988) de la fonction de production agrégée qui permet un retour à l'équilibre automatique et sans friction à la suite d'un choc. En l'absence de nouveaux chocs exogènes, les chemins de croissance produits par IMACLIM-R ressemblent à l'équilibre stationnaire « à la Solow » après des transitions d'ajustement.

2 Données

Le choix d'une représentation en quantités physiques tangibles induit des exigences plus fortes sur les données de calibrage du modèle. Il est nécessaire de reconstituer une matrice de comptabilité sociale duale en valeur et en quantités physiques. Pour cela il faut superposer puis combiner des tableaux de données macroéconomiques en valeur ainsi que des bilans énergétiques en flux physiques. Cette opération pose des problèmes non triviaux d'harmonisation, en particulier concernant les prix qui découlent de la division des valeurs par les quantités correspondantes, nous pouvons ainsi obtenir des prix différenciés selon les agents économiques consommateurs ou des valeurs aberrantes. Un investissement important est nécessaire pour rectifier la matrice hybride afin d'éviter des erreurs importantes de calibrage, par exemple dans l'estimation des paramètres des fonctions de choix des technologies ou de commerce international. Sands et *al.* (2005) détaillent clairement les enjeux de ce travail sur les données en comparant les données hybrides contenues dans le modèle GTAP-E et celles qui ont été préparées par l'équipe de SGM, deux bases de données harmonisées avec des méthodes d'hybridation différentes. Dans le modèle IMACLIM-R, nous avons recréé notre propre matrice hybride à partir des données macroéconomiques de GTAP 6 (année de référence 2001), des bilans énergétiques issus de ENERDATA 4.1, complétés de données de l'Agence Internationale de l'Energie, et enfin des données de transport de passagers fournies par (Schäfer et Victor, 2000). La version d'IMACLIM-R utilisée dans cette thèse est une version mondiale à 12 régions et 12 secteurs. L'horizon temporel du modèle est porté à 2100 pour examiner les trajectoires de stabilisation des concentrations à cet horizon, même si l'incertitude sur les potentiels de croissance démographique et économique ou de progrès technologique devient beaucoup plus importante au-delà de 2050. La répartition en régions et l'agrégation en secteurs à partir des régions[7] et secteurs[8] d'origine dans GTAP 6 est décrite dans les tableaux suivants.

[7] Pour la description complète des régions de GTAP 6.0 voir : https://www.gtap.agecon.purdue.edu/donnéesbases/v6/v6_régions.asp

[8] Pour la description complète des secteurs de GTAP 6.0 voir: https://www.gtap.agecon.purdue.edu/donnéesbases/v6/v6_sectors.asp

Régions IMACLIM-R	***Régions GTAP***
Etats-Unis	*USA*
Canada	*Canada*
Europe élargie	*Austria, Belgium, Denmark, Finland, France, Germany, United Kingdom, Greece, Ireland, Italy, Luxembourg, Netherlands, Portugal, Spain, Sweden, Switzerland, Rest of EFTA, Rest of Europe, Albania, Bulgaria, Croatia, Cyprus, Czech Republic, Hungary, Malta, Poland, Romania, Slovakia, Slovenia, Estonia, Latvia, Lithuania.*
OCDE Pacifique	*Australia, New-Zealand, Japan, Korea.*
CEI	*Russian Federation, Rest of Former Soviet Union.*
Chine	*China*
Inde	*India*
Brésil	*Brazil*
Moyen Orient	*Rest of Middle East*
Afrique	*Morocco, Tunisia, Rest of North Africa, Botswana, South Africa, Rest of South African CU, Malawi, Mozambique, Tanzania, Zambia, Zimbabwe, Rest of SADC, Madagazcar, Uganda, Rest of Sub-Saharan Africa.*
Reste de l'Asie	*Indonesia, Malaysia, Philippines, Singapore, Thailand, Vietnam, Hong Kong, Taiwan, Rest of East Asia, Rest of Southeast Asia, Bangladesh, Sri Lanka, Rest of South Asia, Rest of Oceania.*
Reste de l'Amérique Latine	*Mexico, Rest of North America, Colombia, Peru, Venezuela, Rest of Andean Pact, Argentina, Chile, Uruguay, Rest of South America, Central America, Rest of FTAA, Rest of the Caribbean.*

Tableau 1 : Agrégation des régions

Secteurs IMACLIM-R	***Secteurs GTAP***
Charbon	*Coal*
Pétrole	*Oil*
Gaz	*Gas*
Produits raffinés	*Petroleum and carbon products*
Électricité	*Electricity*
Construction	*Construction*
Transport aérien	*Air transport*
Transports par voie d'eau	*Sea transport*
Transport public terrestre	*Other transport*
Agriculture et agro-industries	*Paddy rice, Wheat, Cereal grains nec, Vegetables, fruit, nuts, Oil seeds, Sugar cane, sugar beet, Plant-based fibers, Crops nec, Cattle, sheep, goats, horses, Animal products nec, Raw milk, Wool, silk-worm cocoons, Forestry, Fishing, Meat, Meat products nec, Vegetable oils and fats, Dairy products, Processed rice, Sugar, Food products nec, Beverages and tobacco products.*
Industries	*Minerals nec, Textiles, Wearing apparel, Leather products, Wood products, Paper products, publishing, Chemical, rubber, plastic prods, Mineral products nec, Ferrous metals, Metals nec, Metal products, Motor vehicles and parts, Transport equipment nec, Electronic equipment, Machinery and equipment nec, Manufactures nec.*
Autres industries et Services	*Rest of sectors*

Tableau 2 : Agrégation en secteurs

3 Equilibre statique

L'équilibre statique est un équilibre *walrasien* pour les secteurs de biens et services : les marchés domestiques et internationaux sont équilibrés par l'intermédiaire des prix relatifs régionaux et internationaux. Les ajustements des marchés dépendent des comportements des agents représentatifs du côté de la demande et du côté de l'offre, c'est-à-dire : (i) de la maximisation de la fonction d'utilité du ménage représentatif de chaque pays ou région sous contrainte de budget, (ii) des décisions des investisseurs concernant l'allocation des investissements entre secteurs, (iii) des choix des entreprises concernant leur taux d'utilisation des capacités de production installées, (iv) des routines de décision dans les politiques et les dépenses publiques, (v) des ajustements des flux commerciaux et de capitaux aux conditions économiques domestiques et internationales. Le calcul de l'équilibre détermine les prix relatifs, les salaires, le taux d'emploi, les quantités de biens et services échangés et les flux de valeur. A l'équilibre, toutes ces variables sont telles qu'elles satisfassent les conditions d'équilibre des marchés pour tous les biens échangeables sous les contraintes de budget des agents et des régions. Le caractère dual de la représentation de l'économie permet d'imposer explicitement un principe de conservation en masse des flux physiques à côté de l'équilibre des flux monétaires, pour les biens et services. Cependant, du côté de la production, le taux d'utilisation des capacités de production peut varier et il n'y a aucune garantie que la force de travail soit complètement employée, l'utilisation optimale des facteurs de production n'est donc jamais garantie sur l'ensemble des trajectoires simulées.

Dans les pages suivantes, nous décrivons les équations de l'équilibre statique qui déterminent les ajustements de court terme, et nous brossons un tableau général des modules dynamiques qui conditionnent la croissance et son contenu. L'indice k renvoie aux régions, les indices i et j renvoient aux biens et secteurs, l'indice t renvoie à l'année courante et t_0 à l'année de calibrage 2001.

3.1 Demande des Ménages en biens, services et énergie

La demande finale des ménages est calculée en résolvant un programme de maximisation de l'utilité d'un consommateur représentatif par région[9]. Comme nous allons le souligner dans ce qui suit, l'originalité de ce programme réside dans les arguments de la fonction d'utilité et dans l'existence de deux contraintes de budget (revenu et temps).

3.1.1 Revenu et épargne

Le revenu des ménages de la région k est égal, comme indiqué dans l'équation (2.1), à la somme des salaires perçus dans tous les secteurs j de cette région (l'offre de travail est supposée

[9] Nous suivons ici Muellbauer (1976) qui affirme que la légitimité de l'hypothèse du consommateur représentatif est de fournir « *an elegant and striking informational economy* », en capturant le comportement agrégé de la demande finale à travers la maximisation de l'utilité. Cette spécification reste valide aussi longtemps que la dispersion des caractéristiques des consommateurs individuels n'évolue pas radicalement (Hildenbrand, 1994).

non mobile), des dividendes des secteurs productifs, qui sont une part fixe ($div_{k,i}$) des profits sectoriels de la région concernée (nous ne prenons pas ici en compte la détention de capitaux étrangers et leur rémunération), et des transferts des administrations publiques. L'épargne des ménages est une proportion ($1\text{-}ptc_k$) de ce revenu, fixe dans l'équilibre statique (2.2).

$$Income_k = \sum_j wages_{k,j} + \sum_j div_{k,j} \cdot profits_{k,j} + transfers_k \quad (2.1)$$

$$Savings_k = (1 - ptc_k) \cdot Income_k \quad (2.2)$$

3.1.2 Fonction d'utilité

Les arguments de la fonction d'utilité U sont (i) les biens $C_{k,i}$ produits par les secteurs de l'agriculture, l'industrie et les services, (ii) le service de mobilité $S_{k,mobility}$ et (iii) les services résidentiels $S_{k,housing}$. Les besoins fondamentaux pour chaque bien et service sont notés bn.

$$U = \prod_{\substack{goods\ i \\ (agriculture, \\ industry, \\ services)}} \left(C_i - bn_i\right)^{\xi_i} \cdot \left(S_{\text{housing}} - bn_{\text{housing}}\right)^{\xi_{\text{housing}}} \cdot \left(S_{\text{mobility}} - bn_{mobility}\right)^{\xi_{\text{mobility}}} \quad (2.3)$$

Les consommations d'énergies finales ne contribuent pas directement à la formation de l'utilité et sont seulement considérées comme des intermédiaires nécessaires à la fourniture des services énergétiques résidentiels et de mobilité. Les dépenses associées à ces consommations affectent en revanche l'équilibre de l'économie et le bien-être des agents en s'amputant au revenu réel disponible.

La consommation d'énergie liée au logement dépend directement du stock physique de logements et de coefficients unitaires de consommation d'énergie par m^2, ces coefficients traduisent à la fois le niveau des services énergétiques résidentiels et l'efficacité énergétique des équipements utilisés pour les fournir.

Le calcul de la consommation liée à la mobilité est plus complexe : il prend en compte non seulement l'efficacité énergétique des véhicules, mais aussi le degré d'accessibilité et d'efficacité de quatre modes de transport concurrents : les modes publics terrestres, le mode aérien, le mode automobile et les modes non-motorisés (cycles, marche à pied). Du fait des différences d'aménités fournies par chaque mode et selon les particularités régionales, les modes de transport sont supposés être des substituts imparfaits. Les passagers-kilomètres (pkm_{mode}) consommés par les ménages dans les différents modes sont agrégés dans un seul indice de mobilité, *via* une fonction à élasticité de substitution constante (CES).

$$S_{k,mobility} = \left(\left(\frac{pkm_{k,air}}{b_{k,air}} \right)^{\eta_k} + \left(\frac{pkm_{k,public}}{b_{k,public}} \right)^{\eta_k} + \left(\frac{pkm_{k,cars}}{b_{k,cars}} \right)^{\eta_k} + \left(\frac{pkm_{k,nonmotorized}}{b_{k,nonmotorized}} \right)^{\eta_k} \right)^{-1/\eta_k} \quad (2.4)$$

La raison pour laquelle nous ne faisons pas figurer l'énergie dans la fonction d'utilité est notre volonté de représenter explicitement les stocks d'équipements, les demandes induites par ces équipements, et l'évolution de leur efficacité énergétique. Nous pouvons ainsi expliciter les paramètres qui déterminent l'inertie des comportements de consommation et les effets rebond,

c'est-à-dire les augmentations de consommation consécutives à une augmentation de la performance énergétique des équipements. Les consommations d'énergies finales (E_i) directement supportées par les ménages sont dérivées des niveaux de services $S_{k,housing}$ et $pkm_{k,cars}$ à travers l'équation (2.5):

$$C_{k,Ei} = pkm_{k,cars} \cdot \alpha_{k,Ei}^{Cars} + S_{k,housing} \cdot \alpha_{k,Ei}^{m^2} \tag{2.5}$$

Dans cette équation, α^{cars} est la consommation d'énergie moyenne pour transporter un passager-kilomètre avec le parc existant de véhicules particuliers et α^{m^2} , la consommation de chaque type d'énergie par mètre carré de surface résidentielle. Ces paramètres sont maintenus constants pendant la résolution de l'équilibre statique ; leur évolution entre deux équilibres statiques est modélisée dans les modules dynamiques que nous décrirons en détail dans le chapitre suivant.

3.1.3 Programme de maximisation

Pour mieux prendre en compte les liens qui existent entre la formation de la demande finale, les infrastructures disponibles et le niveau d'équipement des ménages, les consommateurs représentatifs maximisent leur utilité respective sous une double contrainte :

- Une **contrainte de revenu disponible** qui impose que la somme des achats de biens et services non-énergétiques $C_{k,i,}$ et des dépenses d'énergie (induites par le transport automobile et les usages finaux dans le secteur résidentiel) soit égale au revenu disponible pour la consommation (2.6), pour un vecteur donné de prix au consommateur $pC_{k,i}$,

$$ptc_k \cdot Income_k = \sum_i pC_{k,i} \cdot C_{k,i} + \sum_{Energies\ Ei} pC_{k,Ei} \cdot \left(pkm_{k,cars} \cdot \alpha_{k,Ei}^{cars} + S_{h,housing} \cdot \alpha_{k,Ei}^{m^2} \right) \tag{2.6}$$

- Une **contrainte de budget temps** qui impose un plafond supérieur au temps moyen quotidien consacré aux déplacements. Cette contrainte repose sur la loi empirique dite « de Zahavi » (Zahavi et Talvitie, 1980), qui met en évidence que le temps moyen de transport quotidien des ménages reste à peu près constant depuis plusieurs décennies pour un large éventail de zones urbanisées, et malgré d'importantes substitutions modales au cours des périodes étudiées. Le choix entre différents modes de transport dépend en fait non seulement de leurs prix relatifs mais aussi de leurs efficacités marginales en temps de transport $\tau_{k,Tj}$, c'est-à-dire le temps requis pour parcourir un kilomètre additionnel avec chaque mode T_j. Chaque mode est ainsi caractérisé par une *efficacité en temps de déplacement* spécifique qui décroît avec le taux d'utilisation de ses infrastructures. Plus on approche de la limite de capacité $Captransport_{k,Tj}$ de ces infrastructures (exprimée en kilomètres de route ou de rail, ou en siège-kilomètre), moins le mode considéré sera efficace à cause de la congestion ou bien d'une non-disponibilité des infrastructures pour ce type de déplacement. La contrainte de budget temps s'écrit ainsi[10] :

[10] En supposant une durée de déplacement de 1.1 heure par jour, le temps total annuel affecté aux déplacements est donné par $Tdisp_k = 1.1 \cdot 365 \cdot L_k$ où L_k est la population totale.

$$Tdisp_k = \sum_{means\ of\ transport\ T_j} \int_0^{pkm_{k,T_j}} \tau_{k,T_j}\left(\frac{u}{Captransport_{k,T_j}}\right)du \qquad (2.7)$$

Comme nous l'expliquerons dans le chapitre suivant, la capacité maximale de chaque mode de transport change dans le temps en fonction de la quantité d'investissement affecté à chaque type d'infrastructure.

3.2 Contraintes de production et courbes d'offre

A chaque point du temps, les secteurs productifs sont supposés opérer sous la contrainte d'une capacité de production maximale fixe $Cap_{k,i}$, définie comme le niveau maximum de production physique possible avec les équipements installés. Le modèle permet toutefois des ajustements de court terme aux conditions du marché *via* des modifications du taux d'utilisation $Q_{k,i}/Cap_{k,i}$ de ces capacités installées. Cette spécification représente un écart significatif par rapport à la technique habituelle des fonctions de production explicites, puisque ici le facteur « capital » n'est pas toujours complètement employé. Ce choix découle de trois constatations empiriques :

- dans de nombreux secteurs, au-delà d'un certain taux d'utilisation des équipements, le rendement diminue, ce qui mène à des coûts marginaux opérationnels plus élevés qu'en conditions normales d'exploitation,
- des marges de sécurité sont établies pour faire face à des incidents techniques ou des opportunités de vente inattendues,
- les industries intensives en capital déterminent leurs créations de capacités nouvelles sur des tendances de long terme, mais elles subissent les hauts et les bas de la demande qui leur est adressée, en fonction des cycles économiques de court-terme.

Dans IMACLIM-R les producteurs sont décrits par une courbe d'offre incluant des rendements statiques décroissants : les coûts de production augmentent quand le taux d'utilisation de la capacité des équipements s'approche de 100 % (Figure 4). *A priori*, ces rendements décroissants sont susceptibles de concerner tous les *inputs* intermédiaires, y compris le travail. Dans IMACLIM-R, pour des raisons de simplicité et suivant les ordres de grandeur dégagés dans Corrado et Mattey (1997), nous supposons que la cause première de la hausse des coûts de production pour des taux d'utilisation des capacités élevés réside dans des *coûts du travail* plus élevés, du fait d'heures supplémentaires à la fois plus chères et à une productivité plus faible, des surcoûts du travail de nuit et de la croissance des besoins de maintenance.

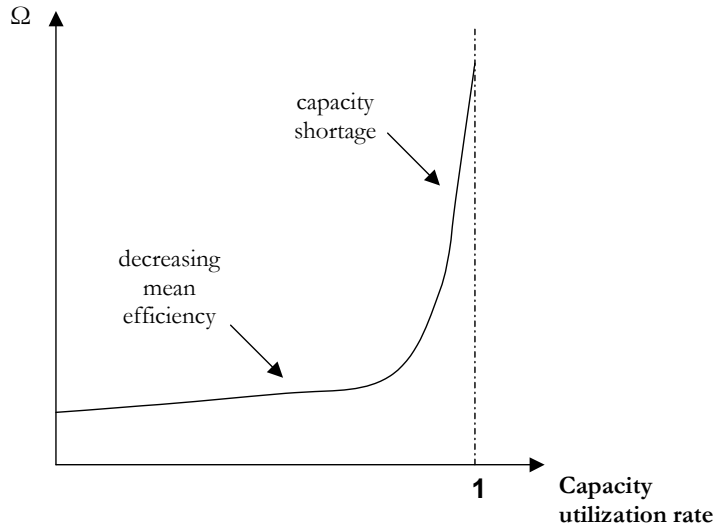


Figure 4 : Rendements statiques décroissants

Nous supposons donc pour le calcul des coûts moyens de production :

- des coefficients *input-output* fixes pour une utilisation « normale » des capacités installées et qui représentent le fait que, vu les caractéristiques techniques moyennes du capital installé, produire une unité d'un bien i dans la région k nécessite des quantités physiques fixes $IC_{j,i,k}$ en biens intermédiaires j et $l_{k,i}$ en travail ;
- un paramètre de rendement décroissant qui dépend du taux d'utilisation des capacités $\Omega_{k,i}=\Omega(Q_{k,i}/Cap_{k,i})$ et qui s'applique seulement aux salaires moyens à l'échelon du secteur[11] (2.9)

Cette approche fait écho à des travaux précédents sur l'existence de la flexibilité à court terme des systèmes de production à l'échelon des secteurs. Ces travaux, à l'origine des discussions sur les investissements *putty-clay* (Johansen, 1959), démontrent que cette flexibilité de court terme découle moins de la substitution des *inputs* que des variations dans les taux d'utilisation, différenciés en fonction des capacités de production.

Nous dérivons de ces hypothèses une expression des coûts de production moyens $Cm_{k,i}$ (équation (2.8)), qui dépendent des prix des biens intermédiaires $pIC_{j,i,k}$, des coefficients input-ouput $IC_{j,i,k}$ et $l_{k,i}$, des salaires de référence $w_{k,i}$, et du niveau de production, *via* le facteur de rendement décroissant $\Omega_{k,i}$, appliqué aux coûts du travail (qui prennent en compte les taxes sur les salaires $tax^{w}_{k,i}$) .

$$Cm_{k,i} = \sum_{j} pIC_{j,i,k} \cdot IC_{j,i,k} + \left(\Omega_{k,i} \cdot w_{k,i}\right) \cdot l_{k,i} \cdot (1 + tax^{w}_{k,i}) \qquad (2.8)$$

[11] Le traitement des coûts de production du pétrole brut est une exception : le facteur croissant porte sur le taux de marge, pour rendre compte du fait que des producteurs oligopolistiques peuvent tirer parti de la pénurie pour augmenter leur taux de marge.

Les prix de production sont égaux à la somme du coût moyen de production et du profit moyen. Dans la version courante du modèle, tous les secteurs appliquent un taux de marge différencié mais constant $\pi_{k,i}$ comme indiqué dans l'équation (2.9), sauf pour les producteurs de pétrole brut dont le taux de marge dépend du taux d'utilisation de leurs capacités. Un taux constant revient en fait à une maximisation du profit pour les producteurs dont les coûts moyens de production suivent l'équation (2.8) et qui sont « *price takers* », à condition que le facteur de rendement décroissant puisse être approximé par une fonction exponentielle du taux d'utilisation. C'est effectivement le cas de notre fonction de rendements décroissants, qui n'est pas exponentielle pour des raisons de facilité de résolution numérique[12] mais dont la forme au voisinage de l'utilisation normale des capacités est très proche d'une fonction exponentielle.

$$\mathrm{p_{k,i}} = \sum_j \mathrm{pIC_{j,i,k}} \cdot IC_{j,i,k} + \left(\Omega_{\mathrm{k,i}} \cdot \mathrm{w_{k,i}}\right) \cdot l_{k,i} \cdot (1 + tax^{w}_{k,i}) + \pi_{k,i} \cdot p_{k,i} \qquad (2.9)$$

Cette équation représente en fait une courbe d'offre inversée qui permet de comprendre comment le producteur représentatif décide de son niveau de production $Q_{k,i}$ (qui est inclus dans le facteur $\Omega_{k,i}$) en fonction de tous les prix et des salaires réels auxquels il est soumis sur les marchés des biens et du travail.

De l'équation (2.9) nous déduisons simplement les salaires et les profits pour chaque secteur :

$$wages_{k,i} = \left(\Omega_{k,i} \cdot w_{k,i}\right) \cdot l_{k,i} \cdot Q_{k,i} \qquad (2.10)$$

$$profits_{k,i} = \pi_{k,i} \cdot p_{k,i} \cdot Q_{k,i} \qquad (2.11)$$

3.3 Administrations

Les ressources des administrations proviennent uniquement des revenus de la fiscalité. Elles sont en équilibre budgétaire avec la somme des dépenses des administrations publiques $G_{k,i}$, des transferts aux ménages $transfers_k$ et des investissements publics dans les infrastructures de transport $InvInfra_k$[13]. Les dépenses des administrations publiques sont supposées suivre la croissance de la population. Les décisions d'infrastructures suivent des routines d'investissement détaillées dans le chapitre suivant. Comme $G_{k,i}$ et $InvInfra_k$ sont fixés de façon exogène dans l'équilibre statique, les gouvernements ajustent simplement les transferts directs aux ménages pour équilibrer leur budget (équation (2.12)). Cette spécification est susceptible de changer en fonction d'informations supplémentaires sur les priorités gouvernementales : chaque terme de cette égalité peut être rendu exogène s'il correspond au critère prioritaire de décision des administrations, impliquant qu'un des

[12] La forme exacte est dérivée d'une fonction arctangente : durant la résolution de l'équilibre, le solveur calcule la valeur de la fonction de rendements décroissants pour des valeurs de taux d'utilisation supérieures à 1, et dans ces cas, la résolution est facilitée par une fonction non exponentielle. Par expérience, une fonction affine d'une fonction arctangente, centrée sur la valeur 1 du taux d'utilisation, permet une résolution numérique facilitée, tout en respectant l'allure de la figure 3.

[13] Nous faisons l'hypothèse que les infrastructures routières sont financées par des dépenses publiques et par des soutiens publics aux industries d'équipement et de construction.

autres termes soit maintenu endogène pour équilibrer le budget. C'est aussi dans cette égalité que pourra être insérée, dans des développements futurs du modèle, la possibilité d'une dette publique persistante, destinée à financer la somme des termes de dépense.

$$\sum \text{taxes}_{\text{k}} = \sum_{i} G_{k,i} \cdot \text{pG}_{\text{k,i}} + \text{transfers}_{\text{k}} + InvInfra_{k} \tag{2.12}$$

3.4 Marché du travail

Dans chaque secteur, la production $Q_{k,j}$ requiert un apport total en travail $l_{k,i} \cdot Q_{k,i}$. Dans chaque région, le taux de chômage est ensuite donné par la différence entre le travail total requis et la population active L_k^{act} :

$$\text{z}_{\text{k}} = \frac{L_k^{act} - \sum_{j} l_{k,j} \cdot \text{Q}_{\text{k,j}}}{L_k^{act}} \tag{2.13}$$

Le taux de chômage z_k a un effet décroissant sur l'ensemble des salaires sectoriels $w_{k,i}$ selon une courbe formellement similaire à une courbe salaire-chômage classique (Figure 5), dont on peut retrouver une discussion détaillée dans Blanchflower et Oswald (1995). En fait, cette courbe peut être interprétée de multiples façons, notamment en considérant le pouvoir de négociation salariale et la rareté de l'offre de travail. Nous rajoutons à ces interprétations usuelles un élément de lecture qui concerne l'économie informelle. En effet, dans un grand nombre de systèmes économiques nationaux ou régionaux, le salaire formel ne représente pas l'essentiel des revenus obtenus en échange du travail effectif. De plus, les notions d'activité salariale ou de population active varient assez fortement selon les pays et régions. Dans notre modèle mondial, nous avons préféré considérer comme population active l'ensemble des individus en âge de travailler (catégorie 18-65 ans) (dont une partie n'est pas au chômage stricto sensu, mais par exemple en formation ou en situation de travail informel). Nous continuerons, par commodité, à employer le terme de taux de chômage alors qu'en fait il s'agit du rapport entre populations employées dans le secteur formel et la totalité des classes d'âge entre 18 et 65 ans.

Les salaires effectifs dans chaque secteur dépendent donc à la fois du niveau régional de l'emploi (*via* la courbe salaire-chômage) et du taux d'utilisation des capacités installées du secteur (*via* le facteur de rendement décroissant Ω).

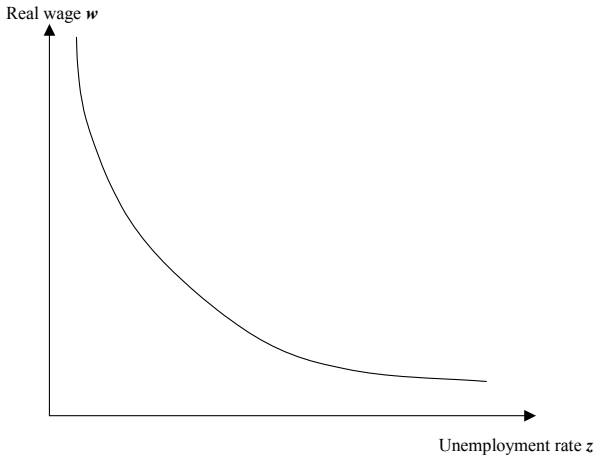


Figure 5 : courbe salaire-chômage

3.5 Flux de capitaux et investissements

3.5.1 Allocation régionale et internationale de l'épargne

Dans le monde réel, les flux de capitaux, la formation de l'épargne et la répartition des investissements dépendent de nombreux facteurs tant *microéconomiques,* comme les taux d'intérêt réels, les attitudes face au risque, les anticipations ou le degré d'accès aux marchés financiers pour les investisseurs individuels, que *macroéconomiques,* avec les politiques fiscales et monétaires, la dette nationale ou l'ouverture des régions à l'investissement direct étranger. En dépit des difficultés pour représenter des interactions aussi complexes dans un modèle global, il est crucial de comprendre comment les flux financiers modifient le fonctionnement même du moteur de la croissance et l'extension du changement technique. Comme l'ont déjà souligné McKibbin et *al.* (1999), l'évaluation des politiques globales énergétiques et climatiques doit prendre en compte l'impact potentiel de fortes modifications des flux commerciaux (bouleversement des échanges énergétiques, apparition de nouveaux flux financiers liés aux marchés du carbone, impact sur la compétitivité des structures de production) sur les comptes courants, sur les investissements et finalement sur les prix relatifs. En vue de saisir ces interactions cruciales, nous avons adopté les options de modélisation suivantes :

- Les ressources financières domestiques disponibles pour l'investissement résultent de la somme de l'épargne et de la part des profits qui n'est pas directement redistribuée aux ménages.

- Pour déterminer leurs investissements dans les nouvelles capacités de production, les agents forment des anticipations adaptatives sur les prix, les taux de profit et les demandes futures, en fonction des tendances passées et de la situation présente. A partir de ces anticipations, ils formulent une demande de financement, adressée aux marchés financiers. La demande globale d'investissement dans chaque région est alors donnée par la somme des besoins d'investissement de tous les secteurs.

- Dans chaque région, les ressources financières disponibles sont alors mises en regard de la demande globale de financement. Les régions disposant d'un surplus de ressources financières deviennent exportatrices nettes de capitaux. Elles retiennent les ressources strictement nécessaires pour satisfaire leur demande interne et alimentent un pool financier international avec le solde. Ce pool réalloue la somme des contributions des régions en excédent à l'ensemble des régions en prenant en compte les demandes d'investissement non satisfaites dans celles qui sont en déficit de financement, la profitabilité moyenne des investissements, ainsi que des risques-pays (exogènes) susceptibles de faire obstacle aux investissements directs étrangers.

- Les ressources financières nettes disponibles qui résultent de ce schéma dans chaque région sont allouées entre les secteurs en proportion de leurs besoins en investissement. L'investissement est utilisé dans chaque secteur pour construire de nouvelles capacités de production avec un nouvel ensemble de technologies, ce qui implique l'achat de différents biens – la plupart étant fournis par les secteurs de la construction et de l'industrie (voir §3.5.2).

La balance des capitaux est donnée par la différence entre capitaux exportés et capitaux importés. La balance des capitaux et la balance commerciale se compensent réciproquement à l'équilibre, du fait de la conservation des flux de valeurs dans chaque région[14]. Tout déplacement des flux de capitaux ou commerciaux devra être contrebalancé par un déplacement des prix relatifs dans chaque région, entraînant instantanément des modifications au niveau des exportations et des importations.

3.5.2 Achat de biens d'équipement

Le montant total d'investissement $InvFin_{k,i}$ alloué au secteur i dans la région k permet de construire de nouvelles capacités $\Delta Cap_{k,i}$ à un coût unitaire $pCap_{k,i}$ (équation (2.14)). Le coût unitaire $pCap_{k,i}$ dépend des quantités $\beta_{j,i,k}$ et des prix $pI_{k,j}$ des biens j requis par la construction d'une unité de nouvelle capacité dans le secteur i et dans la région k (éq. (2.15)). Afin d'être cohérent avec la réorientation des investissements vers des technologies plus ou moins intensives en capital, les paramètres $\beta_{j,i,k}$ sont modifiés selon les caractéristiques technologiques des nouveaux équipements : ils encapsulent à la fois la structure de la demande en biens d'équipement et l'évolution de leur intensité capitalistique, elles-mêmes fonction du changement technique. Dans chaque région, on en déduit la demande totale en biens pour construire de nouvelles capacités productives (éq. (2.16)).

$$\Delta Cap_{k,i} = \frac{InvFin_{k,i}}{pCap_{k,i}} \tag{2.14}$$

$$pCap_{k,i} = \sum_{j} \left(\beta_{j,i,k} \cdot pI_{k,j} \right) \tag{2.15}$$

[14] Mais cette règle de comptabilisation vérifiée dans la réalité est ici observée sans considérer d'autres ajustements qui pourraient aussi intervenir sur la balance extérieure dans le monde réel, comme les variations des stocks de devises dans les banques centrales par exemple.

$$I_{k,j} = \sum_{\text{sectors } i} \beta_{j,i,k} \cdot \Delta Cap_{k,i} \qquad (2.16)$$

3.6 Marchés des biens et commerce international

Tous les biens et services peuvent être échangés sur les marchés internationaux. Au niveau de chaque poste de demande (ménages, biens d'investissements, demande des administrations, consommations intermédiaires), la demande totale de biens se décline en demande de biens domestiques et demande de biens importés. Pour éviter de suivre tous les flux bilatéraux, ce qui n'est pas crucial pour l'objectif de nos simulations, tous les flux d'échange internationaux sont supposés transiter par un pool mondial d'échange. Pour chaque bien, la dynamique du commerce international dépend de deux variables :

- les parts dans chaque région des biens domestiques ($shareC^{dom}_{k,i}$) et des biens importés ($shareC^{imp}_{k,i}$) dans les consommations des ménages, des administrations, de l'investissement et dans les consommations intermédiaires (notées C, G, I et IC respectivement)
- la part de marché de chaque région en tant qu'exportateur sur les marchés internationaux ($MS^{X}_{k,i}$).

Un problème bien connu des modélisateurs porte sur le moyen de traduire le fait que des biens produits dans des régions différentes coexistent sur les marchés mondiaux malgré des différences de prix importantes. La pratique habituelle est d'adopter une spécification issue de l'article d'Armington (1969), fondée sur l'hypothèse que les biens de même type, produits dans des régions différentes, ne sont pas des substituts parfaits. La conséquence de cette substitution imparfaite est que les quantités de ces produits identiques de différentes origines doivent être agrégées dans un index quantitatif différent d'une simple addition, par exemple par un indice CES. Nous avons adopté cette spécification pour tous les biens non-énergétiques. Celle-ci permet effectivement de représenter des marchés où les biens produits localement gardent une partie du marché domestique même si leur prix est plus élevé que le prix mondial wp_i, et où différents exportateurs coexistent effectivement sur le marché mondial même avec des prix différents.

Nous devons ici insister sur le fait que ce choix de modélisation, qui permet d'équilibrer les marchés domestiques et internationaux en valeur, impose un écart réel par rapport aux principes qui fondent IMACLIM-R. En effet, comme la spécification d'Armington présente l'inconvénient majeur de ne pas permettre d'additionner les biens identiques produits dans des régions différentes, cela n'est pas compatible avec une comptabilité physique des flux d'énergie ou de matériaux. En fait, cette spécification reste satisfaisante pour les biens qui représentent des agrégats de plusieurs produits très hétérogènes, et dont les indicateurs physiques ne sont pas directement utiles pour analyser l'interface économie-énergie-environnement. En revanche, pour tous les autres produits, en particulier les biens énergétiques, nous supposons une substituabilité parfaite qui permet un contrôle de l'équilibre des flux physiques. Mais pour éviter que l'exportateur au plus bas prix ne prenne toutes les parts de marché, nous utilisons un modèle simple d'allocation des parts de marché. Le pool international achète des biens énergétiques aux prix de production régionaux (auxquels s'ajoutent des taxes et subventions à l'exportation) et les revend aux importateurs à un prix mondial moyen unique. Ce prix mondial satisfait l'équilibre budgétaire de chaque marché international. Les parts des exportateurs sur le marché international et les parts régionales de l'énergie domestique

versus importée dépendent des prix relatifs différenciés d'exportation, des taxes à l'export et de paramètres de « fragmentation du marché », calibrés de façon à reproduire les parts existantes des différents marchés à l'année de référence[15].

Pour tous les biens, le prix des biens importés p^{Imp} dépend de la valeur du prix mondial wp_i, des taxes ou des subventions à l'import $tax_{k,i}^{imp}$, et des coûts moyens de transport international associés à chaque bien ($wp_{it} \cdot nit_{k,i}$) (éq. (2.17)). Il est ainsi possible de représenter l'impact des prix de l'énergie sur les coûts du transport et finalement sur les flux d'échanges et les schémas de localisation industrielle.

$$p_{k,i}^{Imp} = wp_i \cdot \left(1 + tax_{k,i}^{Imp}\right) + wp_{it} \cdot nit_{k,i} \tag{2.17}$$

Par défaut, nous faisons l'hypothèse d'une poursuite du phénomène de globalisation de façon continue et stable pour fixer les paramètres caractérisant le commerce international.

3.7 Contraintes d'équilibre sur les flux physiques

Les équations (2.18) et (2.19) sont des équations de bouclage des marchés qui garantissent l'équilibre en termes physiques ou quasi-physiques, respectivement pour les biens domestiques et importés[16]. Pour chaque bien, le volume du marché international X_i est égal à la somme de la demande de toutes les importations (équation (2.20)). Les exportateurs fournissent aux marchés internationaux les parts MS^X comme indiqué dans l'équation (2.21).

$$\begin{aligned} Q_{k,i} &= shareC_{k,i}^{dom} \cdot C_{k,i} + shareG_{k,i}^{dom} \cdot G_{k,i} + shareI_{k,i}^{dom} \cdot I_{k,i} \\ &+ [\sum_j Q_{k,j} \cdot IC_{i,j,k} \cdot shareIC_{i,j,k}^{dom}] + X_{k,i} \end{aligned} \tag{2.18}$$

$$\begin{aligned} M_{k,i} &= shareC_{k,i}^{imp} \cdot C_{k,i} + shareG_{k,i}^{imp} \cdot G_{k,i} + shareI_{k,i}^{imp} \cdot I_{k,i} \\ &+ [\sum_j Q_{k,j} \cdot IC_{i,j,k}^{imp} \cdot share_{i,j,k}^{imp}] \end{aligned} \tag{2.19}$$

$$X_i = \sum_k \left(shareC_{k,i}^{imp} \cdot C_{k,i} + shareG_{k,i}^{imp} \cdot G_{k,i} + shareI_{k,i}^{imp} \cdot I_{k,i} + \sum_j shareIC_{i,j,k}^{imp} \cdot IC_{i,j,k} \cdot Q_{k,j} \right) \tag{2.20}$$

[15] Les paramètres de la ventilation domestique/importé comportent les spécificités régionales tels que les réseaux commerciaux, les coûts d'approvisionnement ou les préférences des consommateurs pour des biens produits au niveau national.

[16] Notons que pour les biens énergétiques, les deux équations peuvent être additionnées en une contrainte unique d'équilibre, ce qui n'est pas possible pour les biens dont les échanges sont représentés selon la spécificité d'Armington.

$$X_{k,i} = MS_{k,i}^{X} \cdot X_i \qquad (2.21)$$

3.8 Choix d'un numéraire

La résolution de l'équilibre statique fournit un ensemble complet de quantités et de prix relatifs qui remplissent toutes les équations ci-dessus et nous avons choisi de prendre comme numéraire le prix du bien composite aux USA.

3.9 Émissions de gaz à effet de serre et taxe carbone

3.9.1 Comptabilisation des émissions

Les émissions de gaz à effet de serre comptabilisées dans le modèle se limitent dans l'état actuel aux émissions de CO_2 issues de la combustion des énergies fossiles. La double comptabilité physique et monétaire de l'utilisation et des échanges des biens énergétiques facilite grandement la comptabilisation rigoureuse des émissions. Les sources d'émissions considérées sont les trois formes d'énergies finales (le charbon, le gaz et les carburants liquides) associées dans le modèle aux trois énergies fossiles primaires que sont le charbon, le pétrole brut et le gaz. Les émissions sont comptabilisées au stade où ces trois énergies finales sont brûlées, soit au niveau de la consommation finale d'énergie, soit dans le système de production et de transformation énergétique. Les émissions liées à la consommation de pétrole brut lors de son extraction sont comptabilisées séparément et les émissions liées aux procédés de transformation des énergies primaires fossiles non pétrolières en carburants liquides synthétiques sont attribuées au secteur de transformation énergétique qui permet la production de carburants liquides que nous avons nommé plus haut « secteur carburants liquides ». Les émissions provoquées par la combustion de ces trois énergies finales sont obtenues à partir de la quantité physique d'énergie consommée par le biais des coefficients qui reflètent leur contenu en carbone respectif. Nous considérons ici que le carbone contenu dans une unité d'énergie est totalement émis dans l'atmosphère sous forme de CO_2. Le monoxyde de carbone dont la production est liée à d'éventuelles combustions incomplètes peut être comptabilisé parmi les émissions de CO_2 puisqu'il sera rapidement oxydé naturellement pour devenir du CO_2.

L'impact des émissions de CO_2 calculées par notre modèle sur le climat peut ensuite être évalué à partir d'un modèle climatique compact développé au CIRED (Ambrosi et *al.*, 2003).

3.9.2 Evolution des coefficients d'émissions

Les coefficients qui relient les émissions de CO_2 aux quantités d'énergie consommées sont *a priori* fixés pour toute la durée de la simulation puisqu'ils sont liés au contenu carbone moyen du charbon, du pétrole et du gaz. Deux situations font pourtant exception à cette règle :

- Certains secteurs (en particulier le secteur de la production d'électricité) peuvent mettre en place des technologies de production utilisant des combustibles fossiles avec captage et stockage du carbone (CCS). Dans ces secteurs, les coefficients d'émission évoluent pour ne prendre en compte que les émissions effectivement relâchées dans l'atmosphère.

- Une part des besoins en carburants liquides peut être fournie par des biocarburants. Dans ce cas, le coefficient d'émission régional associé à la combustion d'une unité de carburants liquides est diminué pour ne prendre en compte, pour les biocarburants, que les émissions liées à la culture de la biomasse et à sa transformation.

3.9.3 Taxe carbone

Dans le modèle, une taxe peut être associée aux émissions de carbone issues de la combustion des énergies fossiles. Compte tenu du mode de comptabilisation des émissions, la valeur de cette taxe peut être différenciée selon les secteurs de consommation et les régions du modèle. Cette taxe s'ajoute aux prix finaux d'achat du charbon, du gaz et des carburants liquides, pour les consommations intermédiaires et/ou les consommations finales. Pour chaque type d'énergie considérée, le montant du surcoût lié à la taxe est le produit de son contenu carbone et du montant de la taxe appliquée. Dans chaque région, les revenus totaux de la taxe carbone sont reversés à l'Etat qui recycle ces ressources selon le mode choisi : plusieurs spécifications sont possibles, comme un reversement direct aux ménages (le recyclage dit « *lump sum* ») ou bien une substitution entre les charges pesant sur le facteur travail et les revenus de la taxe carbone.

4 Liens dynamiques : Moteur de croissance et changement technique

Comme cela apparaît dans la Figure 3 présentée en début de chapitre, la dynamique du modèle est liée à l'évolution des paramètres de l'équilibre statique, en fonction des modules intercalés entre deux équilibres successifs dont la fonction est de représenter la façon dont les technologies et les stocks (population, infrastructures, capacités de production, équipements) varient en fonction des signaux économiques et des ressources disponibles.

Dans le modèle, le rythme et la direction de la croissance économique sont gouvernés par :

- **Le moteur de croissance** qui détermine le taux *potentiel* de croissance à chaque période ;
- **le changement structurel induit** qui résulte de l'interaction entre l'évolution de la composition de la demande des ménages et l'évolution de l'appareil productif (productivité et capacité) ;
- **les changements techniques spécifiques** de l'offre et de la demande d'énergie : efficacité énergétique, substitutions entre énergies, ruptures technologiques, effets d'apprentissage sur les nouvelles technologies, évolution des ressources fossiles, etc…

Le point important est que la croissance économique générée par le modèle dans chaque région dépend à la fois de son moteur de croissance, de ses évolutions technologiques, de l'évolution de la structure de sa consommation finale, ainsi que des mécanismes d'interdépendance avec les autres régions. Cette section est limitée à la description du moteur de la croissance et du changement structurel, tandis que nous consacrons le chapitre suivant aux modules dédiés au changement technique dans le secteur énergétique car ils constituent la partie la plus complexe de la dynamique du modèle.

4.1 Le moteur de croissance : démographie, productivité et accumulation de capital

Dans le modèle, le moteur de la croissance est composé (i) d'une dynamique démographique exogène, (ii) d'hypothèses de croissance de la productivité du travail dans chaque région, fondées sur des hypothèses de rattrapage pour les pays en développement, et accompagnées de mécanismes d'intensification en capital, et (iii) d'hypothèses sur l'évolution des taux d'épargne.

4.1.1 Evolution démographique

Les hypothèses démographiques concernent à la fois la population active et la population totale : la première détermine l'offre d'emploi disponible dans une économie, la seconde les niveaux de consommation pour un ratio donné d'équipement des ménages.

La principale incertitude dans les projections démographiques porte sur l'étendue et la rapidité de la transition démographique des pays en développement, ou, autrement dit, sur les hypothèses d'évolution de fertilité. La projection démographique utilisée dans nos simulations correspond au scénario médian des Nations-Unies (*United Nations*, 1998), celle-ci étant par ailleurs la variante retenue dans les scénarios B2 des SRES. Elle prolonge les tendances historiques et fait l'hypothèse d'une transition démographique vers une population mondiale stabilisée s'achevant à la fin du XXI^{eme} siècle. Les taux de fertilité sont supposés converger sur le long terme vers le niveau assurant le renouvellement de la population. Dans les pays industrialisés, la croissance de la population est supposée très lente ; en Asie la population se stabilise dans la seconde moitié du XXI^{eme} siècle, tandis que dans le reste du monde la croissance de la population se ralentit seulement à la fin du siècle (Figure 6). La population mondiale continue de croître durant tout le XXI^{eme} siècle, jusqu'à 9,4 milliards en 2050, puis plus lentement jusqu'à 10 milliards en 2100. Cette trajectoire reste proche de la médiane des projections les plus récentes : l'actualisation de (Vuuren et O'Neill, 2006) consiste principalement à écrêter les estimations de croissance les plus hautes (12 milliards au lieu de 15 milliards) sans modifier significativement les autres trajectoires.

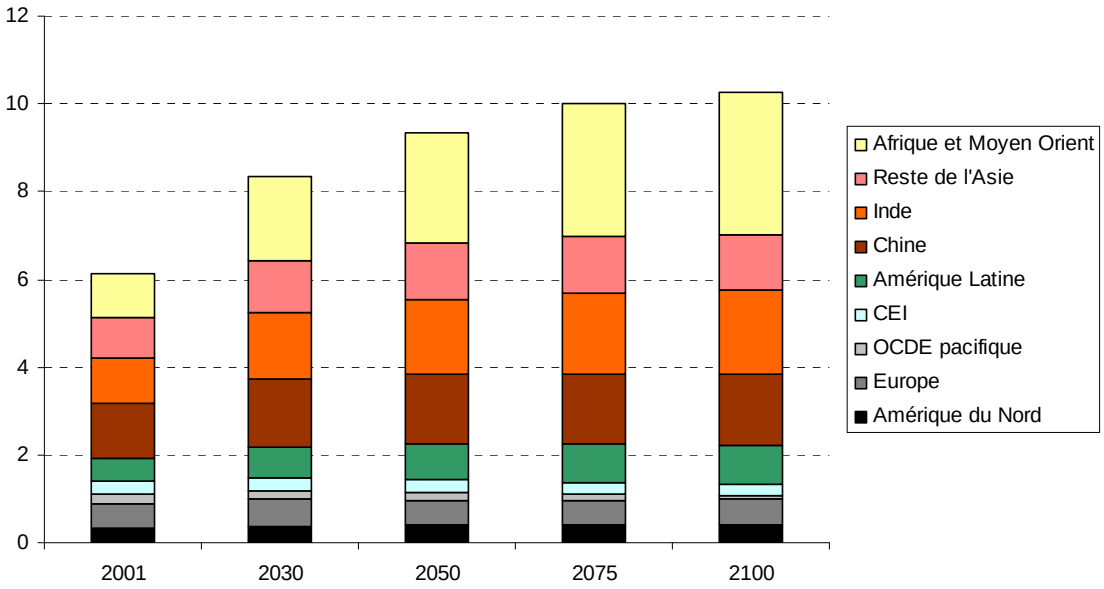


Figure 6 : Population totale (Milliards d'habitants)

Par ailleurs, comme les scénarios disponibles fournis par les Nations-Unies ne contiennent pas de projections de la population active, nous assimilons son évolution à celle de la population en *âge de travailler* correspondant à :

- pour les *pays développés*, la population des 18-64 ans ;
- pour les *pays en développement*, celle des 15-64 ans ;

Cette simplification est discutable, notamment parce qu'elle ne permet pas de prendre en compte les phénomènes complexes liés au déplacement de la frontière entre l'économie formelle et l'économie informelle, ou à la féminisation du travail. Dépasser cette simplification nécessiterait une étude approfondie de la dynamique du marché du travail qui dépasse largement l'ambition de cette thèse. Cette approximation limite l'interprétation de certains résultats, comme l'évolution des taux d'emploi, mais permet de représenter de manière satisfaisante la force de croissance que représente l'évolution de la population active dans chaque région (Figure 7 et Tableau 2) :

- A partir de 2010, les taux de croissance de la population active sont plus faibles que les taux de croissance de la population totale, sur tout le reste de la période, pour l'Amérique du Nord, l'Europe, l'OCDE Pacifique, la CEI et la Chine. La population active devient décroissante avant 2050 pour l'Europe, la CEI et l'OCDE Pacifique ;
- le taux de croissance des populations actives est supérieur à celui de la population totale pour l'Afrique, sur toute la période ;
- dans les autres PED, la population active croît plus rapidement que le reste de la population dans un premier temps, mais avec un écart entre les deux taux de croissance qui se réduit puis s'inverse à partir de dates variables selon les régions : 2010 pour la Chine, à partir de 2030 pour les autres régions.
- la CEI subit une décroissance permanente de sa population totale, accompagnée d'une croissance de la population active jusqu'en 2010 et d'une forte baisse après cette date.

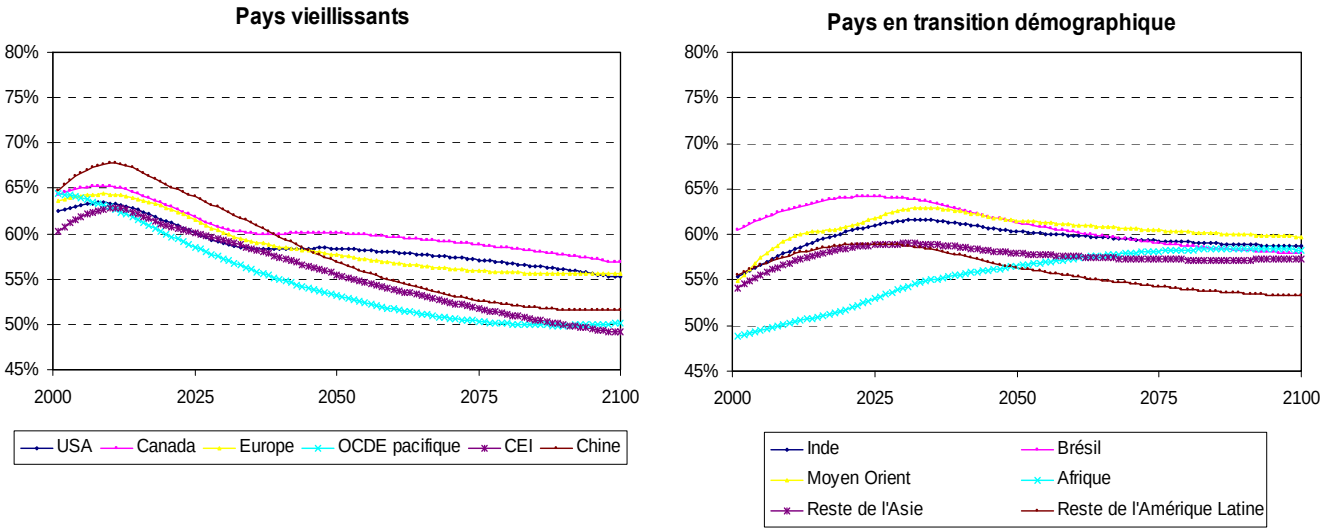


Figure 7 : Ratio de la population active sur la population totale

	2001-2050		2050-2100	
	Population totale	**Population active**	**Population totale**	**Population active**
Etats Unis	0.45%	0.31%	0.09%	-0.03%
Canada	0.39%	0.25%	-0.10%	-0.21%
Europe	-0.05%	-0.25%	0.01%	-0.06%
OCDE pacifique	-0.16%	-0.56%	-1.45%	-1.56%
CEI	-0.02%	-0.18%	-0.17%	-0.42%
Chine	0.43%	0.17%	0.04%	-0.16%
Inde	1.04%	1.21%	0.23%	0.18%
Brésil	0.94%	0.96%	0.19%	0.08%
Moyen Orient	1.38%	1.62%	0.47%	0.41%
Afrique	2.02%	2.32%	0.56%	0.62%
Reste de l'Asie	0.73%	0.86%	-0.09%	-0.12%
Reste de l'Amérique Latine	0.94%	0.96%	0.19%	0.08%

Tableau 2 : Taux de croissance régionaux moyens des populations totales et actives sur les périodes 2001-2050 et 2050-2100

Ces tendances au ralentissement de la croissance démographique et au vieillissement sont susceptibles d'avoir un impact significatif sur les comportements d'épargne et de faire émerger des problèmes chroniques de financement, tant dans les pays développés pour la prise en charge des populations âgées, que dans les pays en développement pour le financement d'une croissance potentiellement très dynamique mais nécessitant un développement important des infrastructures et d'autres investissements lourds (industries lourdes, logement). Nous reviendrons sur la dynamique d'épargne associée à ces scénarios démographiques dans la section 4.1.3.

4.1.2 Productivité du travail

Paradoxalement, la croissance de la productivité du travail, qui est un déterminant central de la croissance économique, reste une faiblesse de la science économique. Le modèle de Solow et les travaux de comptabilité de la croissance qui en dérivent font de ce déterminant le résidu de la croissance inexpliqué par la démographie et l'accumulation de capital.

Dans la réalité, la dynamique générale de « progrès technique » résulte de la combinaison de mécanismes complexes et souvent difficiles à résumer par des relations microéconomiques au paramétrage robuste : émergence et diffusion des innovations, changement d'organisation de la production et de la distribution, économies d'échelle, mécanisation, changement structurel, développement de réseaux de transport et de communication, hausse des compétences, division du travail, etc. Cet ensemble de mécanismes est suffisamment vaste pour que les différentes théories de la croissance continuent à coexister en apportant des éclairages différents sur l'analyse des tendances passées et sur les forces motrices responsables de ces trajectoires. Bien sûr, pour la projection du progrès technique futur, la posture idéale serait de projeter la combinaison des mécanismes ainsi identifiés, de façon à renforcer au maximum la plausibilité des projections, dans les limites inévitables que nous impose l'inconnu des innovations futures. Les potentiels de progrès technique devraient alors être examinés avec soin au niveau de chaque pays ou région relativement homogène, en fonction du degré d'ouverture des économies, des transferts de technologies, de la disponibilité des facteurs de production, et des multiples facteurs de déploiement du changement technique (facteurs naturels, institutions, éducation et formation, épargne, mode de développement).

Mais cette ambition se heurte à de très larges difficultés d'estimation quantitative des différentes dynamiques à l'œuvre dans le changement technique à long terme. Du coup, la posture la plus efficace semble de renoncer à l'agrégation de mécanismes microéconomiques et de chercher une relation empirique agrégée, robuste sur les tendances passées, et supposée encapsuler l'ensemble des mécanismes en jeu. C'est précisément la position de Solow lorsqu'il propose sa fonction de production agrégée, et c'est aussi, par filiation logique, le statut de l'hypothèse du rattrapage (« *catch-up* ») des niveaux de productivité entre pays, utilisée très largement comme cadre de pensée et de projection du progrès technique à un niveau agrégé. Cette hypothèse de rattrapage a fait l'objet d'un vaste débat dans la littérature autour de la notion de convergence entre les économies (Barro et Sala-i-Martin (1991), Barro et Sala-i-Martin (1992), Quah (1996), par exemple).

L'ensemble de ces recherches théoriques et empiriques reste largement trop complexe pour être exploité directement hors du champ des spécialistes et ce notamment dans les projections de long terme utilisées dans le champ de l'énergie et du climat. Le seul fait stylisé qui « percole » en dehors du débat de spécialistes est en fait la « trouvaille » de Barro et Sala-i-Martin (1992), qui affirment que le taux de « rattrapage » de l'écart entre chaque entité et le leader dans les ensembles considérés (régions, pays de l'OCDE, Monde) semble relativement constant et égal à 2% par an, si bien que cette « règle » d'une convergence conditionnelle à 2% par an a un écho très important dans les hypothèses retenues dans les projections de long terme. La conditionnalité étant quelque chose de difficile à traduire en pratique dans les modèles, on observe dans les faits un glissement silencieux vers un « axiome » de convergence absolue à 2% vers le niveau des Etats-Unis.

Pour construire les scénarios régionaux de croissance de la productivité du travail que nous utilisons dans cette thèse, nous avons pris en compte les quelques faits stylisés issus de cette

littérature et des comparaisons que nous avons pues effectuer par rapport aux tendances passées (Maddison, 1995). Ceci reste très phénoménologique mais une base acceptable pour tout exercice concernant les tendances futures (Oliveira Martins, 2005).

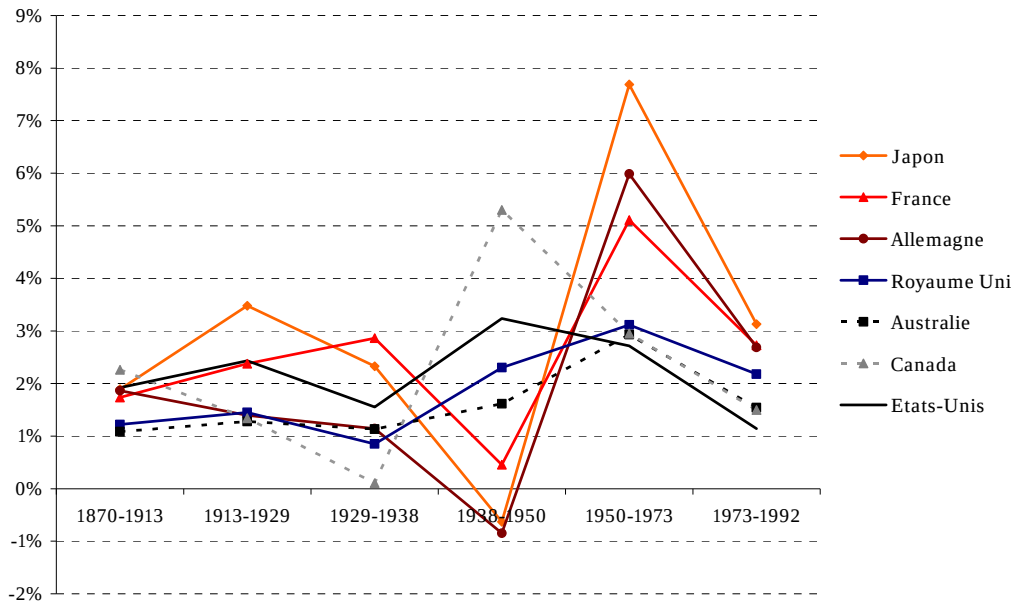


Figure 8 : Taux moyens de productivité horaire
Source : Maddison, 1995

En définitive, les scénarios régionaux de productivité du travail qui sous-tendent nos simulations sont construits à partir des fait stylisés suivants :

- Une **convergence asymptotique des taux de croissance de la productivité moyenne du travail,** vers une tendance de 1.65% par an qui est celle donnée par le CEPII (INGENUE, 2005) lorsqu'on intègre les contraintes de flux intergénérationnels (épargne, retraite, héritage) qui caractériseront le siècle prochain ;

- **Des phases d'accélération et de rattrapage** des gains de productivité pour les PED. Cette phase est par ailleurs supposée être liée, comme cela a été le cas dans les pays développés au cours du XXème siècle, à une phase d'industrialisation et d'équipement, se traduisant par une intensification forte de la production en capital physique (*« capital deepening »*). Durant cette phase, les gains de productivité sont en grande partie liés à une substitution du travail par du capital. Nos hypothèses correspondent à un rattrapage partiel des *niveaux absolus* de productivité des pays industrialisés par les PED. La CEI et cinq des sept zones en développement sont ainsi supposées connaître des phases de rattrapage (pendant lesquelles leur productivité croît plus vite que celle des pays industrialisés) durant une à trois décennies au cours du 21ème siècle. La date de démarrage et la durée des phases de rattrapage sont bien entendu des hypothèses exogènes, étayées par l'observation des tendances en cours dans les différentes régions et des traits structurels qui les caractérisent.

Ainsi, nous considérons que certains PED, tels la Chine, l'Inde ou la CEI ont déjà entamé cette phase, tandis que les pays d'Amérique Latine ne le feront que dans la première moitié du XXI^{ème} siècle. Pour le Moyen-Orient et l'Afrique, nous avons étalé cette phase d'accélération sous la forme d'un rattrapage plus lent et plus progressif, du fait de possibles instabilités politiques et de la persistance possible de freins au développement. La croissance de la productivité de l'Afrique et du Moyen-Orient reste ainsi constante à 2% sur toute la période : on suppose donc que les blocages politiques majeurs observés aujourd'hui et/ou l'usage économiquement non optimal des revenus pétroliers, grèvent les possibilités de développement de ces régions. L'économie du développement qualifie ce type de phénomène de « malédiction des ressources naturelles » (« *natural resource curse* », en anglais) en référence à l'observation empirique selon laquelle les pays ayant des ressources naturelles importantes ont tendance à connaître une croissance plus faible que ceux qui n'en possèdent pas (Sachs et Warner, 1995).

Dans IMACLIM-R, ces deux jeux d'hypothèses, bien qu'exogènes, ne font que prescrire les paramètres de la croissance potentielle (production = population active × productivité du travail). La croissance réelle résulte de l'interaction de ces forces motrices exogènes avec (i) la disponibilité des financements des capacités nécessaires à l'expansion des économies et (ii) le contexte économique courant (prix relatifs, profitabilité, etc). Par défaut, la croissance n'est donc pas *endogène* au sens des théories de la croissance endogène, qui lient de façon endogène les gains de productivité au fonctionnement de l'économie. Mais la croissance réelle simulée est bien *endogène* au modèle : les hypothèses exogènes bornent le domaine du possible au sein duquel les mécanismes de déploiement de la croissance vont opérer.

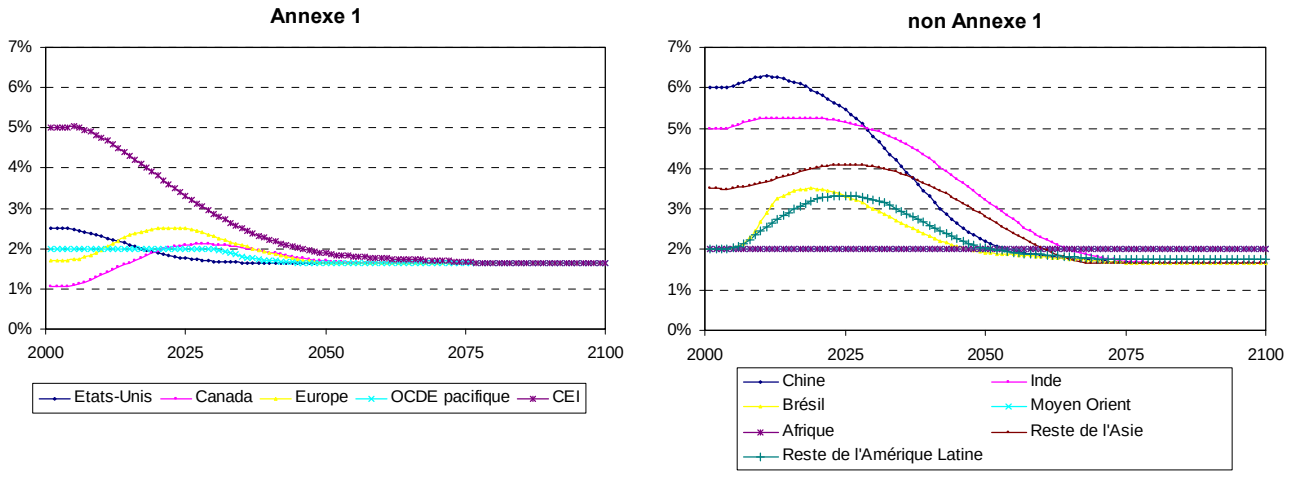


Figure 9 : Taux de croissance annuel de la productivité moyenne du travail

Cependant, nous avons souligné dans le chapitre précédent la nécessité d'explorer de façon plus large l'impact des politiques énergétiques et climatiques sur la croissance économique en étendant le mécanisme d'induction du changement technique au moteur de long terme de la croissance.

Dans ce but, le modèle offre la possibilité de rendre l'évolution de la productivité du travail endogène au fonctionnement de l'économie. Ceci nous conduit à incorporer dans notre structure de

modélisation en équilibre général récursif une partie des innovations théoriques provenant des nouvelles théories de la croissance endogène. Pour cette première tentative, et pour limiter les problèmes de calibrage, nous avons limité l'utilisation de cette spécification aux seuls scénarios avec politique carbone. Le fondement théorique de notre démarche fait référence aux travaux successifs de Frankel (1962), Romer (1986) et Lucas (1988) qui sont cités dans l'ouvrage de synthèse de Aghion et Howitt (1998). Ces travaux se fondent sur l'utilisation du modèle de croissance « AK » dans lequel les gains de productivité générale des facteurs sont reliés de façon endogène à l'accumulation du capital physique. Nous avons adapté cette spécification au modèle IMACLIM-R en rendant l'évolution de la productivité sectorielle du travail dépendante de l'investissement régional cumulé dans chaque secteur. Techniquement, nous calibrons ces fonctions sur le scénario de référence, et si cette spécification est opérante, lorsqu'une politique climatique est mise en place, la modification de la répartition des investissements qu'elle induit altère l'évolution des productivités sectorielles par rapport au scénario de référence. Grâce à cette spécification, nous prenons en compte le changement technique induit par les politiques climatiques au sens large, puisqu'il ne concerne plus seulement le seul secteur énergétique et les coefficients *input/output* (*via* les modules dynamiques sectoriels) mais bien l'ensemble de la productivité des facteurs.

Ces choix de modélisation sont sous-tendus par des hypothèses qu'il convient de souligner avant d'analyser les résultats obtenus puisque nous nous sommes volontairement placés dans une situation extrême où la mise en place des politiques climatiques risque d'avoir une influence forte sur le moteur de croissance :

- Les investissements de recherche et développement (R&D) visant à accélérer les gains de productivité sectorielle ne sont pas explicitement modélisés comme une variable d'ajustement. Nous supposons en fait que la répartition de cet effort est similaire à celle des investissements dans le capital physique. Une prochaine étape consisterait à modéliser la répartition de l'effort de R&D et à utiliser cette répartition comme un levier politique en faveur de la réduction des émissions (en augmentant par exemple, l'effort de R&D alloué aux secteurs de production les moins intensifs en carbone).
- Les externalités positives de connaissance entre régions et entre secteurs ne sont pas prises en compte dans cette modélisation.
- Enfin l'évolution de la productivité sectorielle dépend dans son ensemble d'un lien endogène avec les trajectoires économiques alors que nous pourrions considérer qu'une partie au moins des gains de productivité reste exogène, en suivant le conseil de Clarke (2008). En effet, une trajectoire partiellement exogène de la productivité du travail permet de prendre en compte le caractère encore partiellement incompris du processus d'innovation et donc non modélisable.

Si la validité de nos hypothèses de modélisation peut être discutée, nous justifions notre choix par la volonté d'effectuer une première exploration des conséquences de la prise en compte dans l'évaluation du coût des politiques climatiques, du phénomène d'induction pour l'ensemble du moteur de croissance. Notre objectif est ici de révéler l'existence d'effets de système qui auraient été jusqu'à présent négligés.

4.1.3 Formation de l'investissement et accumulation du capital

Dans l'équilibre statique, les ressources financières disponibles pour l'investissement sont égales à la somme de l'épargne des ménages et des profits qui ne leur sont pas distribués. Ce partage de la valeur ajoutée entre la consommation et l'investissement est fixé à l'échelle de chaque région *via* le taux d'épargne des ménages ($1\text{-}ptc_k$), qui suit une trajectoire exogène, et le taux d'autofinancement ($1\text{-}div_k$), aussi exogène, qui s'applique aux profits des secteurs productifs. Le taux d'autofinancement reste constant alors que les taux d'épargne suivent une tendance à la baisse tout au long de la période qui peut être plus ou moins rapide et prononcée en fonction des régions.

Les trajectoires des taux d'épargne régionaux sont informées par des faits stylisés provenant du modèle macroéconomique INGENUE (INGENUE, 2006). Ce modèle décrit une formation endogène de l'épargne qui prend en compte les évolutions (i) des pyramides des âges régionales, (ii) des besoins de financement des systèmes de retraites et (iii) des flux internationaux de capitaux. L'évolution à la baisse des taux d'épargne régionaux dans IMACLIM-R reflète ainsi le phénomène général de vieillissement des populations. L'intensité de cette baisse dépend à la fois des niveaux de départ (Tableau 3) en 2001, calibrés à partir de la base de données GTAP, et de dynamiques spécifiques régionales. La baisse la plus prononcée au cours de la période est projetée pour la Chine, qui passe de 44 % à 20 %, du fait d'un taux d'épargne très élevé en début de période couplé à un vieillissement rapide de la population. Les Etats-Unis, en revanche, du fait de leur taux de départ très faible, ne connaissent qu'une baisse limitée.

Choisir une évolution prescrite du taux d'épargne informé par les résultats d'un modèle adapté pour faire ces projections reste une approximation à mi-chemin entre une prescription totalement exogène des taux d'épargne régionaux à partir de dires d'experts et une endogénéisation de cette évolution supposée améliorer la cohérence interne des scénarios simulés. Une endogénéisation complète des taux d'épargne sur le long terme nécessiterait en fait une meilleure description de la boucle entre la démographie et la croissance économique. Des avancées dans cette direction sont aujourd'hui entreprises en collaboration avec l'équipe du modèle INGENUE (Aglieta et *al.*, 2001).

USA	9 %	**CEI**	24 %	**Moyen Orient**	20 %
Canada	18 %	**Chine**	44 %	**Afrique**	10 %
Europe	13 %	**Inde**	18 %	**Reste de l'Asie**	22 %
OCDE Pacifique	19 %	**Brésil**	12 %	**Reste de l'Amérique Latine**	11 %

Tableau 3 : Taux d'épargne régionaux à l'année de référence

En combinaison avec les déterminants de long terme décrits en sections 4.1.1 et 4.1.2, la disponibilité des investissements et leur allocation sont des variables déterminantes pour la réalisation de la croissance potentielle en croissance réelle. La quantité d'investissement dans chaque secteur détermine le rythme annuel d'expansion de la capacité productive et le rythme du changement technique incorporé. Comme nous l'avons décrit en section 3.5, les nouvelles capacités de production construites à la période t, notées $\Delta Cap_{k,i}$, s'ajoutent aux capacités déjà existantes qui viennent d'être dépréciées pour donner les nouvelles capacités de production disponibles qui sont utilisées pour calculer l'équilibre de l'économie à la période $t+1$. Ces nouvelles capacités incorporent les technologies les plus récentes. Nous décrivons en détail dans le chapitre suivant le contenu des modules qui déterminent l'adoption de ces nouvelles technologies et l'évolution des

coefficients techniques, dans tous les secteurs. Nous n'exposons ici que la dynamique d'accumulation du capital.

Les capacités productives des secteurs décrits dans le modèle IMACLIM-R suivent par défaut une loi usuelle d'accumulation du capital, avec un taux constant de dépréciation (eq. (2.22)).

$$Cap_{k,i}(t+1) = Cap_{k,i}(t).\left(1 - \frac{1}{Life_time_{k,i}}\right) + \Delta Cap_{k,i} \qquad (2.22)$$

L'évolution de l'ensemble des techniques de production encapsulées dans le stock de capital est décrite selon une spécification « *putty-clay* » : les choix technologiques s'effectuent sans contrainte d'inertie pour les nouveaux investissements puis sont figés dans le capital installé et ne peuvent être modifiés par la suite. Par conséquent, une des limites du modèle dans sa spécification actuelle est qu'il ne permet pas la prise en compte de la substituabilité ex-post des facteurs de production, mais celle-ci reste en général limitée au niveau sectoriel. L'évolution des coefficients techniques $T_C_{k,i}$ (2.23) au cours du temps dépend donc de la valeur courante de ce coefficient et de sa valeur pour les nouvelles capacités construites que nous noterons dans la suite $T_C_new_{k,i}$. La loi dynamique d'évolution est donnée, dans ce cas, par la moyenne pondérée des deux valeurs :

$$T_C_{k,i}(t+1) = \frac{T_C_{k,i}(t) \cdot Cap_{k,i}(t).\left(1 - \frac{1}{Life_time_{k,i}}\right) + T_C_new_{k,i} \cdot \Delta Cap_{k,i}}{Cap_{k,i}(t+1)} \qquad (2.23)$$

Pour les secteurs dont les changements techniques sont décrits avec plus de précision, comme les secteurs de l'électricité, de l'industrie, de l'agriculture, des services ou encore les stocks de véhicules, nous remplaçons cette loi de dépréciation exponentielle par une spécification en génération de capital (2.24). Cette représentation permet de mieux analyser l'inertie caractéristique de chaque secteur concerné. Nous ne l'appliquons pas systématiquement à tous les secteurs par souci de simplicité et de maîtrise de la taille du modèle.

$$Cap_{k,i}(t+1) = \sum_{j=1}^{life_time_{k,i}} Cap_{k,i}^{vintage}(t+j) \qquad (2.24)$$

où $Cap_{k,i}^{vintage}(t + life_time_k) = \Delta Cap_{k,i}$ correspond à la génération de capital constituée des nouvelles capacités construites à la période t, et $life_time_{k,i}$ correspond à la durée de vie des équipements dans le secteur i et la région k. Avec cette convention, la génération de capital dépréciée à la période t est notée $Cap_{k,i}^{vintage}(t)$.

Chaque génération de capital est associée à une valeur du coefficient technique caractérisant les choix technologiques qui ont été effectués au moment de sa construction. La valeur du coefficient technique incorporée dans la génération de capital construite à la période $t\text{-}Life_time_{k,i}+j$ (où t est la période courante) est notée $T_C_{k,i}^{vintage}(t+j)$. La valeur du coefficient technique caractérisant le secteur productif dans l'équilibre statique de la période $t+1$ est alors donnée par la moyenne pondérée des coefficients techniques liés à chaque génération encore installée :

$$T_C_{k,i}(t+1) = \frac{\sum_{j=1}^{life_time_{k,i}} Cap_{k,i}^{vintage}(t+j) \cdot T_C_{k,i}^{vintage}(t+j)}{\sum_{j=1}^{life_time_{k,i}} Cap_{k,i}^{vintage}(t+j)} \quad (2.25)$$

4.2 Changement structurel

L'analyse de la durabilité des trajectoires futures repose sur l'analyse de la croissance et de son contenu matériel et énergétique, lequel dépend de l'interaction entre changement technique et changement structurel. Dans le domaine des politiques énergétiques ou climatiques, une place considérable est accordée au changement technique (efficacité, nouvelles technologies, énergies renouvelables, etc.) et le changement structurel, tout aussi important, est beaucoup moins mis en discussion, alors même que les incertitudes qui l'entourent sont aussi très larges.

En effet, l'examen des trajectoires historiques de la composition des PIB régionaux montre que celle-ci a très fortement évolué au cours du siècle dernier dans la majorité des régions développées. Ainsi, Babiker et *al.* (2001) rapportent que sur la période 1900-1990, la part de l'agriculture dans la composition du PIB est passée de 17% à près de 2% aux Etats-Unis et de 34% à 3% au Japon. Ces évolutions sont souvent perçues comme des « lois naturelles » caractéristiques du mouvement de modernisation, mais elles résultent en fait de l'action conjuguée de l'évolution de la demande adressée aux différents secteurs et de la vitesse relative des gains de productivité qui déterminent le coût de production unitaire des différents biens et services. D'un côté, l'évolution de la demande totale dépend des préférences des ménages, de la consommation de biens pour l'investissement en fonction du changement technique et de la position de la région sur les marchés internationaux. De l'autre côté, les gains de productivité dans chaque secteur modifient les prix relatifs des biens et déplacent progressivement les équilibres entre l'offre et la demande.

Dans une majeure partie des modèles de prospective, les fonctions de demande ne sont pas modifiées au cours des projections sur plusieurs décennies, voire sur un siècle. Et lorsqu'il s'agit de fonctions de type CES (fonctions à élasticités de substitution constantes), homogènes de degré un, les parts de budget restent constantes. Dans tous les cas, le calibrage des fonctions de demande n'est pas robuste pour décrire l'évolution de la demande finale sur plusieurs décennies. Soit il s'agit de fonctions de demande économétriques, dont la portée est surtout valide à court ou moyen terme. Soit il s'agit de fonctions d'utilité, censées représenter un espace de substitutions possibles plus important, mais dont le calibrage sur un seul point perd de la robustesse pour l'étude de trajectoires sur plusieurs décennies. L'usage répandu de cette commodité de calcul masque le fait qu'elle est seulement acceptable à court terme.

Or le soin apporté à l'élaboration des schémas d'évolution de la demande finale est déterminant pour l'analyse de l'interface économie-énergie-environnement sur le long terme, puisqu'un mécanisme essentiel au cœur de cette interface est la saturation potentielle de certains postes de consommation matérielle (calories alimentaires, équipements domestiques, etc.). Cette saturation pour certains biens pourrait aussi être accompagnée de l'explosion d'autres postes (e.g. mobilité à grande vitesse) toute aussi déterminante pour la durabilité des trajectoires.

Pour améliorer la représentation de ces phénomènes déterminants dans l'évolution du contenu matériel de la demande finale et donc des potentiels de dématérialisation de l'économie, l'option de modélisation retenue dans IMACLIM-R consiste à faire évoluer, dans les modules dynamiques, les paramètres des fonctions d'utilité régionales pour représenter de façon très stylisée quelques évolutions caractéristiques :

- **La part des dépenses pour l'achat de biens agroalimentaires dans le budget des ménages décroît avec l'augmentation du revenu**. Dans la fonction d'utilité (Eq. (2.3)), cette part est liée à la valeur du paramètre $\xi_{agriculture}$. A partir des données disponibles à l'année de référence pour les différentes régions du modèle, nous avons estimé une fonction qui lie la valeur de ce paramètre au revenu par habitant exprimé en Parité de Pouvoir d'Achat (PPA). Au cours de la simulation, nous utilisons cette fonction pour déterminer la valeur, à la période *t,* du cœfficient $\xi_{agriculture}$ en fonction de l'évolution de la richesse régionale par habitant. Pour traduire fidèlement le report de la consommation finale des biens agroalimentaires vers le secteur des services, toute variation du paramètre $\xi_{agriculture}$ est inversement contrebalancée par l'évolution opposée du paramètre $\xi_{composite}$. Ce processus de diminution de la part des dépenses agroalimentaires dans le budget des ménages va toucher en particulier les régions non Annexe 1 alors que les régions de l'Annexe 1 sont supposées conserver des parts de budget plus stables sur la période de simulation (Figure 10). Cette dernière constatation est en accord avec les faits observés ces dernières décennies, qui confirment une quasi-stabilité des parts de budget des ménages pour les grands agrégats sectoriels dans les régions les plus économiquement avancées.

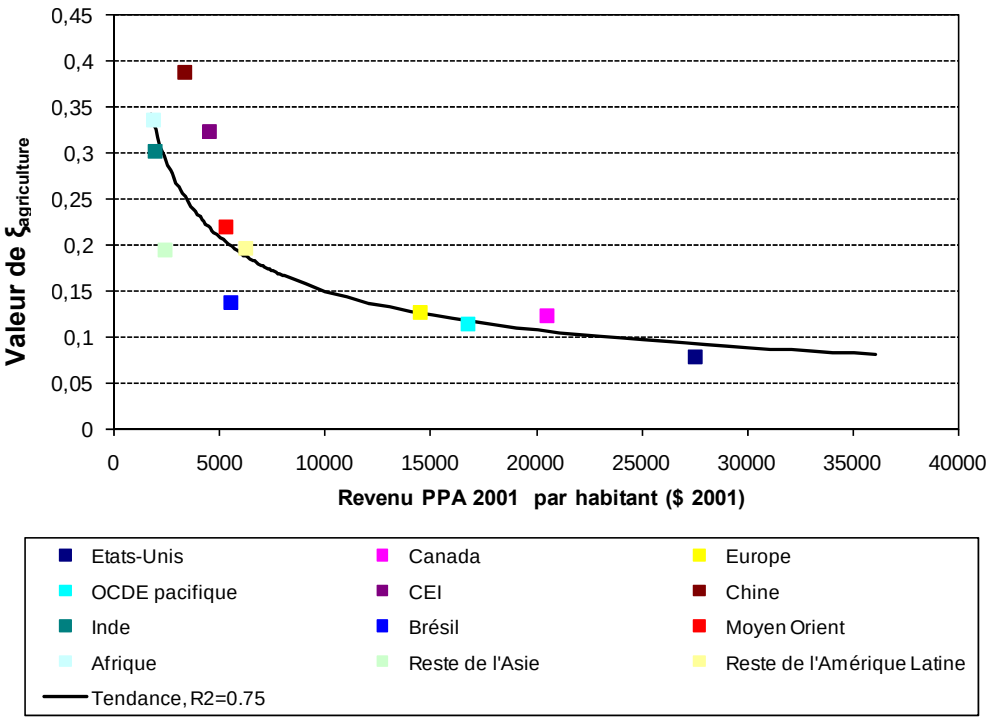


Figure 10 : Valeurs (Revenu PPA par habitant, $\xi_{agriculture}$) pour les douze régions du modèle à l'année de référence et courbe de tendance estimée.

- **Le niveau de consommation finale en produits manufacturés par habitant peut atteindre des asymptotes de saturation**. Ces asymptotes sont exprimées en quantité quasi-physique de bien industriel par habitant et traduisent le processus de dématérialisation progressive de la demande finale des ménages avec l'augmentation des revenus. En pratique, les niveaux des asymptotes, différents pour chaque région, sont des variables de scénario exogènes qui sont exprimées comme des multiples de la consommation de bien industriel par habitant à l'année de référence. Au cours de la trajectoire, dans les modules dynamiques, lorsque la consommation des ménages atteint l'asymptote exogène, le paramètre $\xi_{industrie}$ de la fonction d'utilité est ajusté pour conserver la consommation des ménages au niveau absolu de l'asymptote. Pour conserver l'homogénéité de degré un de la fonction d'utilité, toute variation du paramètre $\xi_{industrie}$ est là encore répercutée sur le paramètre $\xi_{composite}$ traduisant ainsi une tertiarisation de la demande finale des ménages avec l'augmentation de la richesse par habitant.

- **Les politiques d'infrastructures et la répartition modale du transport de passagers impactent durablement la géographie des territoires** et créent des effets d'asymétrie dans les variations de la consommation de transport. Cette constatation s'appuie sur les travaux de Kenworthy et Laube (1999) qui démontrent, à partir d'un travail de comparaison internationale de grandes villes, que la consommation de transport urbain de passagers et sa structure modale dépendent fortement des politiques d'infrastructures et d'aménagement du territoire. Si le fonctionnement de l'économie des régions de l'Annexe 1 est déjà très dépendant de l'utilisation des transports routiers, le transport urbain de passagers dans les PED dépend encore fortement de l'utilisation des transports en commun ou des modes non motorisés. De manière semblable à ce qui a été observé dans les pays de l'OCDE, l'orientation du développement urbain vers l'utilisation du routier dans ces régions risque de provoquer une modification durable de la géographie de ces territoires, qui pourrait empêcher plus tard un éventuel retour à un système de transport fondé sur l'utilisation de modes plus doux. Cette spécificité se traduit dans le modèle IMACLIM-R par la modification itérative des besoins de base associés à la consommation de transport automobile dans la fonction d'utilité : $bn_{automobile}$. Lorsque la consommation de transport automobile augmente dans une région, ce paramètre suit cette augmentation, de manière à traduire la création de nouveaux besoins peu substituables, induits par la modification de la géographie des villes. En cas de tendance à la baisse de la consommation de transport automobile, la réaction du paramètre $bn_{automobile}$ n'intervient qu'avec de l'inertie pour refléter le temps caractéristique, très long, des réaménagements urbains et des changements d'usage.

Conclusion

Ce chapitre donne une présentation du modèle IMACLIM-R. Il explicite les choix de modélisation servant de base pour une architecture hybride, modulaire et adaptable, conçue pour répondre aux besoins multiples et évolutifs d'une équipe de modélisation prospective, travaillant en particulier sur les politiques énergétiques et climatiques. Ce même chapitre montre précisément comment ces choix de modélisation se déclinent pour une version mondiale du modèle, multi-régions et multi-secteurs, en détaillant les équations centrales de la représentation statique de

l'économie et de la dynamique du moteur de croissance. Cette description détaillée du modèle permet de montrer qu'il combine les variables physiques et les variables économiques, « supports » bien choisis pour la représentation des mécanismes susceptibles de compter dans l'analyse des trajectoires de long terme, comme les forces motrices de la croissance économique ou de l'évolution du contenu physique et énergétique des trajectoires de développement (capacités physiques de production, coefficients techniques, stocks d'équipements et d'infrastructures, budget-temps, besoins de base, transport international, fiscalité, échanges de capitaux, etc.).

En plus du choix d'une représentation physique complète, l'originalité d'IMACLIM-R par rapport aux modèles existants repose sur deux innovations importantes :

(i) L'abandon des fonctions de production et d'utilité usuelles, qui élargit les possibilités de description des évolutions techniques des secteurs et des préférences des consommateurs finaux, mais, en contrepartie, exige une représentation exhaustive conjointe de l'évolution de tous les coefficients techniques. Cette représentation n'est plus conditionnée aux seuls choix des valeurs des paramètres d'élasticité des fonctions de production ou d'utilité, elle repose sur des formes réduites de modèles détaillées ; en d'autres termes elle est confiée à la partie « *bottom-up* » du modèle, qui sera décrite dans le chapitre suivant.

(ii) La possibilité d'une utilisation partielle des facteurs de production existants. Cette possibilité permet de représenter les canaux de propagation et de fluctuations impliqués dans les conséquences à court terme des tensions mal anticipées ou des chocs exogènes.

Ces choix de modélisation permettent d'étudier quelles peuvent être les barrières à la croissance : des barrières de *court terme* lorsqu'une situation mal anticipée place l'économie en déséquilibre (chômage, sur- ou sous-capacités de production, inadéquation entre les technologies installées et les prix relatifs des énergies, etc.) ; des barrières de *long terme* quand les possibilités de croissance sont bornées par des limites de convergence sectorielle, une insuffisance de ressources pour investir et/ou une population en déclin.

Enfin, le choix des variables « support » de la représentation de l'économie, ainsi que la structure modulaire et ouverte de l'architecture correspondent à l'ambition de disposer d'un outil permettant d'étudier l'évolution structurelle des économies résultant de l'interaction entre les changements de modes de consommation (C), les évolutions technologiques (T) et les choix de localisation des activités (L). Nous retrouvons là le diagnostic que nous portions dans le chapitre précédent sur l'état des lieux de la modélisation du changement technique endogène et aussi un fil rouge des travaux réalisés au CIRED depuis plusieurs décennies qui nous invitent à penser l'évolution du monde comme interaction dynamique plutôt que comme une projection « déroulante » de trajectoires de croissance et de changement technique. Ces rétroactions sont créatrices de fortes inerties dans l'évolution des systèmes et interviennent de façon centrale dans la formation des coûts de changement de trajectoire. Ce modèle permet ainsi de prendre en compte la problématique de l'évolution des systèmes techniques dans un cadre de cohérence améliorée par rapport à des approches purement technologiques.

Dans le chapitre qui suit, nous nous concentrons sur les modules de choix technologiques qui interviennent dans la phase dynamique du modèle IMACLIM-R et qui sont déterminants pour l'évolution du secteur énergétique. Le nombre de modules concernés est important et leur présentation pourra paraître fastidieuse. Pourtant, c'est là que se joue une partie importante de la

démonstration concernant la capacité de l'approche adoptée à *hybrider* une analyse en équilibre général avec des informations sectorielles.

Bibliographie

Aglietta, M., Arezki, R., Breton, R., Fayolle, J., Juillard, M., Lacu, C., Cacheux, J. L., Rzepkowski, B., Touzé, V., 2001, "INGENUE, a multi-regional computable general equilibrium, overlapping-generations model", *INGENUE Team*. Mimeo, CEPII, CEPREMAP, MINI-University of Paris X and OFCE. Internet: http://ideas.repec.org/p/sce/scecf0/178.html.

Aghion, P., Howitt P., 1998, "Endogenous Growth Theory". Cambridge, MA: MIT Press, 684 p.

Ambrosi P., Hourcade J.C., Hallegatte S., Lecocq F., Dumas P., Ha Duong M., 2003, "Optimal Control Models and Elicitation of Attitudes Towards Climate Damages", *Environmental Modeling and Assessment* 8(3): pp 133-147.

Armington, P. S. (1969). "A Theory of Demand for Products Distinguished by Place of Production", IMF, *International Monetary Fund Staff Papers* 16: pp 170-201.

Arrow, K., J., Debreu, G., 1954, "Existence of equilibrium for a competitive economy", *Econometrica* 22, pp. 265–290.

Babiker, M.H., Reilly, J.M., Mayer, M., Eckaus, R.S., Wing, I.S., Hyman, R.C., 2001, "The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model: Revisions, Sensitivities, and Comparisons of Results", Report No. 71, *Joint Program on the Science and Policy of Global Change*, MIT, Cambridge, MA.

Barro R. J., Sala-i-Martin X., 1991, "Convergence Across States and Regions", *Brookings Papers of Economic Activity*, 1991:1.

Barro R. J., Sala-i-Martin X., 1992, "Convergence", *Journal of Political Economy*, v. 100, #21, p.223-251.

Barro R. J., Sala-i-Martin X., 1998, *Economic Growth*, MIT Press.

Berndt E., Wood D., 1975, "Technology, Prices and the Derived Demand for Energy", *The Review of Economics and Statistics*, August, pp 259-268.

Blanchflower D. G., Oswald A. J. ,1995, "An Introduction to the Wage Curve", *Journal of Economic Perspectives,* 9(3), pp 153-167.

Chung, J., 1994, "Utility and Production Functions" , Blackwell, Oxford.

Clarke, L., Weyant, J., Edmonds, J., 2008, "On the sources of technological change: What do the models assume", *Energy Economics*, Volume 30, Issue 2, March 2008, pp. 409-424.

Cohen, A.J., and G.C. Harcourt, 2003, "Whatever Happened to the Cambridge Capital Theory Controversies?", *Journal of Economic Perspectives,* 17(1): pp. 199-214.

Corrado C., Mattey, J., 1997, "Capacity Utilization", *Journal of Economic Perspectives*, Vol. 11, No. 1, pp. 151-167.

Domar, E. D., 1946, "Capital Expansion, Rate of Growth, and Employment", *Econometrica*, 14, pp. 137-147.

Frankel, M., 1962, “The production function in allocation and growth: a synthesis”, *American Economic Review* 52, pp. 995-1022.

Frondel M., Schmidt M. C., 2002, “The Capital-Energy Controversy: An Artifact of Cost Shares?”, *The Energy Journal* Vol.23, Issue 3, pp 53-79.

Ghersi F., Hourcade J.-C., 2006, Macroeconomic consistency issues in E3 modeling: the continued fable of the elephant and the rabbit, *The Energy Journal*, 27 (Special Issue n°2: *Hybrid Modeling of Energy-Environment Policies: Reconciling Bottom-up and Top-down*), pp 27-49.

Harrod, R. F., 1939, “An Essay on Dynamic Theory”, *Economic Journal,* 49, pp. 14-33.

Hildenbrand W., 1994, *Market Demand: theory and empirical evidence*, Princeton University Press.

Hourcade J.C., 1993, “Modelling long-run scenarios. Methodology lessons from a prospective study on a low CO2 intensive country”, *Energy Policy* 21(3): pp 309-326.

INGENUE, 2006, “World Growth and International Capital Flows in the XXIrst Century”, *Document de travail OFCE*, n° 2006-07, avril.

Johansen L., 1959, “Substitution versus Fixed Production Coefficients in the Theory of Growth: A synthesis”, *Econometrica,* 27, pp 157-176.

Jorgenson D.W. , Fraumeini B., 1981, “Relative Prices and Technical Change”*,* in Berndt E.R., Field B.C. (eds.), *Modelling and Measuring Natural Resource Substitution*, MIT Press, Cambridge MA, United States.

Kenworthy, J.R., Laube, F.B., 1999, “Patterns of automobile dependence in cities: an international overview of key physical and economic dimensions with some implications for urban policy”, *Transportation Research Part A* 33, pp. 691-723.

Kim S.H.., Edmonds, J., Lurz, J., Smith, S.J., Wise, M., 2006, “The Object-oriented Energy Climate Technology Systems (ObjECTS) Framework and Hybrid Modeling of Transportation in the MiniCAM Long-Term, Global Integrated Assessment Model.” *The Energy Journal*, 27 (Special Issue n°2: *Hybrid Modeling of Energ-Environment Policies: Reconciling Bottom-up and Top-down*).

Lucas, R., E., 1988, “On the Mechanics of Economic Development”, *Journal of Monetary Economics* 22(1), pp. 3-42.

Maddison, A., 1995, *Monitoring the World Economy: 1820 – 1992*, OECD Development Center, 260 p.

McFarland J. R., Reilly J. M., Herzog H. J., 2004, “Representing Energy Technologies in Top-Down Economic Models using Bottom-Up Information”, *Energy Economics*, Vol 26, Issue 4, July, pp 685-707.

McKibbin, W. , Ross, M., Shackleton, R., Wilcoxen, P., 1999, “Emissions Trading, Capital Flows and the Kyoto Protocol”, *The Energy Journal Special Issue*, “The Costs of the Kyoto Protocol: A Multi-model Evaluation”, pp287-334.

Muellbauer J., 1976, “Community Preferences and the Representative Consumer”, *Econometrica*, 44(5), pp 979-999.

Oliveira Martins, J., Gonand F., Antolin P., de la Maisonneuve C., and Kwang-Y, 2005, "The impact of ageing on demand, factor markets and growth", *OECD Economics Department Working Papers*, #420, OECD Economics Department.

Quah, D., 1996, "Empirics for economic growth and convergence", *European Economic Review*, vol. 40, no. 6, pp. 1353-1375.

Romer, P., M., 1986, "Increasing Returns and Long Run Growth", *Journal of Political Economy* 94(5), pp. 1002-1037.

Sachs, J. D., Warner, A., M., 2001, "The Curse of Natural Resources," *European Economic Review*, Vol. 45, No. 4–6, pp. 827–38.

Samuelson P. A., 1962, "Parable and Realism in Capital Theory: The Surrogate Production Function", *Review of Economic Studies*, 29, No. 3.

Sands, R., D., Miller, S., Kim, M.-K., 2005, "The Second Generation Model: Comparison of SGM and GTAP Approaches to Data Development", *Pacific Northwest National Laboratory*, PNNL-15467, 2005.

Schäfer A., Victor D.G., 2000, "The future mobility of future population", *Transportation Research Part A*, 34, pp 171-205.

Solow, R., M., 1956, "A Contribution to the Theory of Economic Growth", *Quarterly Journal of Economics* 70(1), pp. 65-94.

Solow, R., M., 1957, "Technical change and the aggregate production function", In *Business Cycle Theory*, ed. FE Kydland, pp. 38-46.

Solow, R., M., 1988, "Growth theory and after", *The American Economic Review,* 78:3, pp 307-317.

Stiglitz, J.E., 1990, "Comments: Some Retrospective Views on Growth Theory", in P. Diamond, ed., *Growth/Productivity/Unemployment: Essays to Celebrate Robert Solow's Birthday*, pp. 50-68, Cambridge, MA: MIT Press.

United Nations, 1998, "World Population Prospects: The 1998 Revision."

Vuuren D., O'Neill B., 2006, "The Consistency of IPCC's SRES Scenarios to 1990–2000 Trends and Recent Projections", *Climatic Change*, Vol. 75, 1-2, pp. 9-46.

Zahavi Y., Talvitie A., 1980, "Regularities in Travel Time and Money Expenditures", *Transportation Research Record* 750, pp13-19.

Chapitre 3

Intégration des informations sectorielles dans le cadre de l'équilibre général : Défis et méthodes

Table des matières

1 PRODUCTION D'ENERGIE PRIMAIRE : DISPONIBILITE, PRODUCTION ET MISE SUR LE MARCHE DES RESSOURCES PETROLIERES 103

1.1 UNE EXPLICATION DE LA COURBE DE HUBBERT 105
1.1.1 Des découvertes dépendantes de deux mécanismes antagonistes 105
1.1.2 De la découverte à la production 106
1.1.3 Relier le modèle de Hubbert aux signaux économiques : l'apport du modèle LOPEX 108
1.2 INTRODUCTION DES COURBES DU HUBBERT DANS LE MODELE IMACLIM-R 109
1.2.1 Désagrégation des réserves de pétrole 109
1.2.2 Courbes de Hubbert et capacités de production 111
1.2.3 Comportement des producteurs 112
1.2.4 La formation des prix du pétrole 113

2 TRAITEMENT DES AUTRES COMBUSTIBLES FOSSILES 114

2.1 PRODUCTION DE GAZ NATUREL ET FORMATION DES PRIX 114
2.2 PRODUCTION DE CHARBON ET FORMATION DES PRIX 114

3 TRANSFORMATION ENERGETIQUE : OFFRE ALTERNATIVE DE CARBURANTS LIQUIDES 115

3.1 BIOCARBURANTS 116
3.1.1 Part de marché et contraintes d'offre 116
3.1.2 Formation du prix et structure de coût 117
3.2 CARBURANTS SYNTHETIQUES 118

4 GENERATION D'ELECTRICITE : PRISE EN COMPTE DES CONTRAINTES DE LA COURBE DE CHARGE 119

4.1 DES TECHNOLOGIES DE PRODUCTION EXPLICITES DETAILLEES EN GENERATION DE CAPITAL 120
4.2 LA CONTRAINTE PHYSIQUE ET TEMPORELLE DE LA COURBE DE CHARGE 123
4.3 PLANIFICATION OPTIMALE DES INVESTISSEMENTS EN ANTICIPATION IMPARFAITE 126
4.3.1 Projection de la demande et anticipation du prix des combustibles 126
4.3.2 Détermination, en amont, des investissements dans les capacités de production renouvelables non hydrauliques 127
4.3.3 Investissement prioritaire dans l'hydroélectrique 129
4.3.4 Parc de production conventionnel 130
4.3.5 Composition de l'investissement courant : minimisation de la distance entre parc de production optimal anticipé et parc installé 133
4.4 DU PARC DE PRODUCTION INSTALLE AU COUT MOYEN DE PRODUCTION 134

5 DEMANDES D'ENERGIE FINALE 137

5.1 CONSOMMATIONS INTERMEDIAIRES D'ENERGIE DES SECTEURS PRODUCTIFS 137
5.2 USAGES RESIDENTIELS 140
5.3 TRANSPORTS 143
5.3.1 Véhicules particuliers : stock et intensité énergétique 143
5.3.2 Autres moyens de transport : capacités et consommations d'énergie 146
5.3.3 Evolution de la demande de transport par les autres secteurs 148

6 LE PROGRES TECHNIQUE 148

CONCLUSION 149

BIBLIOGRAPHIE 151

Ce chapitre s'attache à décrire les modules dynamiques qui assurent l'hybridation de l'analyse macroéconomique avec des informations techniques sectorielles. L'objectif des modules dynamiques est de modifier les contraintes techniques qui s'appliquent à l'économie dans l'équilibre statique. Ces modifications concernent les structures de coût de production des secteurs ainsi que les stocks d'équipements énergétiques des ménages et leur efficacité.

Nous commençons par décrire l'évolution des contraintes qui portent sur la production des combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz). Ensuite, nous nous intéressons à la production des carburants liquides et de l'électricité. Enfin nous portons notre attention sur les coefficients techniques caractérisant la consommation finale d'énergie (i) des secteurs industriels, agricoles ou de production de service et (ii) des ménages avec les usages résidentiels ou de transport.

1 Production d'énergie primaire : disponibilité, production et mise sur le marché des ressources pétrolières

La déplétion des ressources pétrolières et la menace que représente cette contrainte pour la croissance future ont été des questions centrales dans les travaux de prospective de long terme entrepris depuis plusieurs décennies, suscitant des controverses à répétition sur le niveau exact des ressources disponibles, les délais d'épuisement, ou encore les stratégies de sécurité d'approvisionnement. Les tentatives de projection des prix ou des ressources disponibles publiées jusqu'à ce jour ayant montré leur manque de fiabilité, tout exercice de prospective sur cette question est contraint d'adopter une certaine humilité, faute de pouvoir établir la preuve de sa supériorité sur les méthodes précédentes peu robustes. Néanmoins, nous ne pouvons contourner le problème, car à l'échelle des cinquante prochaines années, le tempo de l'épuisement des ressources pétrolières est un paramètre central des dynamiques énergétiques.

La littérature et les débats scientifiques sont marqués par une bipolarisation entre deux représentations du marché du pétrole sur le long terme, dans une controverse qui n'est pas sans rappeler de façon presque caricaturale l'opposition entre économistes et ingénieurs.

La première représentation est liée au modèle de Hotelling (Hotelling, 1931) qui constitue le modèle intertemporel « canonique » de l'exploitation optimale d'une ressource non renouvelable. Dans ce modèle, le producteur maximise son profit en répartissant l'exploitation des ressources sur l'ensemble des périodes considérées, en fonction du coût d'opportunité associé à l'extraction de la ressource. Ce coût d'opportunité correspond à la valeur monétaire associée au fait de *ne pas* exploiter une unité de ressource aujourd'hui, c'est-à-dire de se priver aujourd'hui d'un revenu qui aurait pu être réinvesti ailleurs. Sur un sentier de croissance équilibré, l'optimum d'exploitation se traduit par un taux d'augmentation du prix de la ressource égal au taux d'actualisation. C'est une rente pure de rareté associée à l'extraction d'une unité de ressource, qui ne doit pas être confondue avec la rente *Ricardienne* (ou rente *différentielle*), qui est générée par la présence sur un même marché de pétroles ayant des coûts de production différents mais vendus au même prix (Szklo et *al.*, 2007). Même si la version originale du modèle de Hotelling n'incluait pas les coûts de production, leur introduction dans des versions ultérieures, avec l'hypothèse que les producteurs agissent rationnellement en exploitant leurs ressources par ordre de coût croissant, ne modifie pas la nature du résultat. Elle ne fait qu'introduire les rentes différentielles en plus dans le modèle.

La principale critique adressée à ce modèle dans le cas de la production pétrolière, réside dans le fait que les producteurs peuvent disposer librement de l'ensemble de leurs réserves à tout instant (Rehrl et Friedrich, 2006). Or le rythme d'exploitation des ressources dans chaque gisement est soumis à des contraintes physiques qui ne permettent pas de le modifier librement, si bien que l'ensemble des réserves n'est pas disponible à tout instant pour les producteurs. En fait, la contrainte physique sur la disponibilité du pétrole est double (Rehrl et Friedrich, 2006) :

- **A l'échelle d'un champ pétrolier**, le taux d'extraction est contraint par les caractéristiques physiques des réservoirs et ne peut être augmenté qu'au prix d'une forte hausse des coûts d'extraction, avec un risque important de diminution du taux de récupération du pétrole dans la nappe[17]. Le coût marginal d'extraction est lié à la vitesse d'extraction. A partir d'une étude des champs pétroliers de la mer du Nord, Bentley et *al.* (2002) ont remarqué que le profil d'extraction d'un champ est habituellement constitué d'une croissance rapide d'environ deux ou trois ans, d'un court plateau durant entre zéro et deux ans et d'un long déclin qui peut durer trente ans ou plus pour les champs les plus importants. Ce profil semble peu sujet à variation, ce qui tend à confirmer que la marge de manœuvre pour modifier le débit d'extraction d'un champ pétrolier déjà en production reste limitée physiquement et/ou économiquement.

- **A l'échelle régionale**, un producteur doit en général lancer des investissements d'exploration et de mise en production pour de nouveaux champs de pétrole s'il veut augmenter sa production, même lorsqu'il dispose encore de réserves non exploitées. Les délais qui séparent la prospection de la mise en exploitation dépassent souvent quinze ans, une inertie qui ne compense pas la rigidité temporelle que le producteur subit sur ses réserves en cours d'exploitation. L'augmentation de la production de pétrole est ainsi très liée au processus lent d'exploration/prospection, ce qui instaure aussi au niveau global une forte contrainte sur la disponibilité temporelle des ressources de pétrole.

C'est précisément sur ces deux constats que repose le modèle de Hubbert (Hubbert 1956, 1962) qui constitue une représentation alternative du marché du pétrole. Ce modèle prescrit, à l'échelle régionale, que la production de pétrole suit une courbe en cloche symétrique selon une approche phénoménologique. L'observation des productions passées permet de calibrer la hauteur et l'étalement de cette courbe. Au départ, cette hypothèse est fondée sur la constatation empirique d'un profil en cloche pour la production de pétrole aux Etats-Unis[18]. Les justifications apportées plus tard par la littérature reposent (i) d'une part sur le constat que la sommation, sur un grand nombre de champs, du profil d'exploitation observé à l'échelle d'un seul champ conduit à la production d'un tel profil (Bentley et *al.*, 2002), (ii) d'autre part sur le lien logique et temporel entre le profil des découvertes et celui de la production (Laherrère, 2001 ; Rehrl et Friedrich, 2006).

La principale faiblesse du modèle de Hubbert réside dans l'absence de prise en compte de signaux économiques comme les prix de marché dans le comportement des producteurs. Or les

[17] Le taux de récupération correspond à la part du pétrole initialement présent dans la nappe qui est finalement extrait, il vaut aujourd'hui 35% en moyenne.

[18] Historiquement, le succès intellectuel de ce modèle a été soutenu par la « bonne » prédiction faite par Hubbert dans les années 60 sur le profil futur de la production de pétrole aux Etats-Unis.

signaux-prix courants et anticipés conditionnent la quantité de réserves économiquement exploitables et les incitations à investir dans l'exploration et la prospection, qui modifieront le rythme des découvertes. Récemment, le rapport World Energy Outlook (AIE, 2004) estimait, sur la période 1990-2004, que l'élasticité moyenne au prix du pétrole des dépenses mondiales pour l'exploration et la prospection avoisine 0.5, soulignant l'importance du contexte économique courant dans la dynamique d'évolution du marché du pétrole sur plusieurs décennies.

Pour pallier cette faiblesse et tenter de réconcilier la rationalité économique et les contraintes physiques, Rehrl et Friedrich (2006) proposent d'incorporer des courbes de Hubbert dans un modèle d'optimisation intertemporelle de l'exploitation de la ressource pétrolière (modèle LOPEX). Les « affinités » de cette méthode avec la stratégie de modélisation d'IMACLIM-R nous ont conduit à construire le module dynamique dédié à l'évolution des capacités de production pétrolières à partir du modèle LOPEX. Les paragraphes qui suivent détaillent la représentation du lien entre les signaux économiques, les profils temporels d'exploration et de production contraints physiquement, les stratégies de marché et à nouveau la dynamique des prix, dans l'architecture récursive du modèle IMACLIM-R.

1.1 Une explication de la courbe de Hubbert

Rehrl et Friedrich (2006) proposent un modèle des mécanismes de découverte et de mise en production qui implique des courbes de production de pétrole semblables aux courbes de Hubbert. Ce modèle est fondé sur des hypothèses qui impliquent que, dans chaque région, les découvertes de pétrole cumulées suivent une équation de croissance logistique ; c'est ce qui fonde le caractère « en cloche » du taux annuel de découverte.

1.1.1 Des découvertes dépendantes de deux mécanismes antagonistes

Dans le modèle, la probabilité de réussite d'une campagne d'exploration pétrolière dépend de la résultante d'un effet d'information favorisant les nouvelles découvertes et d'un effet de déplétion diminuant les chances de nouvelles découvertes.

L'***effet d'information*** repose sur l'accumulation de connaissances concernant :

- **La localisation géographique des ressources**, ce qui va permettre de concentrer les recherches dans les zones où la présence de pétrole est la plus probable. Le niveau de connaissance géologique d'une région dépend principalement du nombre de sondages et de découvertes déjà effectués dans une région : on suppose alors que la probabilité de trouver des gisements dans une région est d'autant plus forte que de nombreuses découvertes y ont déjà été faites.

- **Les techniques de prospection**, ce qui permet d'augmenter les chances de trouver effectivement les champs pétroliers lorsqu'ils sont présents dans la région. Un effet d'apprentissage s'applique aux technologies d'exploration au fur et à mesure de l'accumulation des découvertes.

Posons *I(t)* un index d'information qui encapsule l'accumulation des connaissances géologiques et technologiques. Nous pouvons traduire l'*effet d'information* en le décomposant en deux équations. La première relie le niveau d'information *I(t)* au montant des découvertes cumulées *D(t)*, la seconde relie le taux de découverte $\partial D/\partial t$ au niveau d'information *I(t)*. L'ensemble des deux équations représente un processus classique d'apprentissage : l'expérience dans l'exploration pétrolière est nourrie par les découvertes en même temps qu'elle facilite les découvertes.

$$I(t) \propto D(t) \tag{3.1}$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} \propto I(t) \tag{3.2}$$

L'***effet de déplétion*** provient du caractère fini de la ressource pétrolière – nous noterons Q_∞ le volume total des ressources de pétrole initialement disponibles. Cet *effet de déplétion* implique, à l'inverse du précédent, que la difficulté de découvrir de nouveaux gisements augmente avec le nombre de découvertes déjà réalisées, c'est-à-dire que le taux de découverte est une fonction croissante de la quantité de pétrole restant dans le sol :

$$\frac{\partial D}{\partial t} \propto \left[Q_\infty - D(t)\right] \tag{3.3}$$

Par combinaison des équations (3.1), (2.1) et (3.3), nous obtenons que les découvertes cumulées suivent une équation différentielle de croissance logistique :

$$\frac{dD(t)}{dt} = K.D(t).\left(Q_\infty - D(t)\right) \tag{3.4}$$

où *K* est une constante.

La solution à une telle équation est donnée par :

$$D(t) = Q_\infty . \frac{1}{1+e^{-b(t-t_0)}} \tag{3.5}$$

En différentiant cette expression, nous obtenons le taux de découverte :

$$\frac{dD(t)}{dt} = Q_\infty .b. \frac{e^{-b(t-t_0)}}{\left[1+e^{-b(t-t_0)}\right]^2} \tag{3.6}$$

Cette équation donne au profil temporel des découvertes de pétrole la forme d'une courbe « en cloche », caractéristique de la modélisation « à la Hubbert ».

L'équation logistique obtenue ci-dessus repose sur des hypothèses simplificatrices importantes, notamment l'hypothèse que les liens (3.1), (2.1) et (3.3) sont linéaires. Par contre, ce raisonnement conduit toujours, quelles que soient les formes mathématiques choisies, à une courbe de découverte d'abord croissante (l'effet d'information est dominant) puis décroissante (l'effet de déplétion devient dominant).

1.1.2 De la découverte à la production

Les travaux empiriques de Laherrere (2003) tendent à corroborer la capacité prédictive de ce modèle. En effet, ces travaux montrent, pour plusieurs régions du monde, que les découvertes suivent effectivement des courbes en cloche. Ils montrent aussi que la production effective de pétrole suit une courbe similaire à la courbe des découvertes avec une translation dans le temps de quelques décennies (Figure 11).

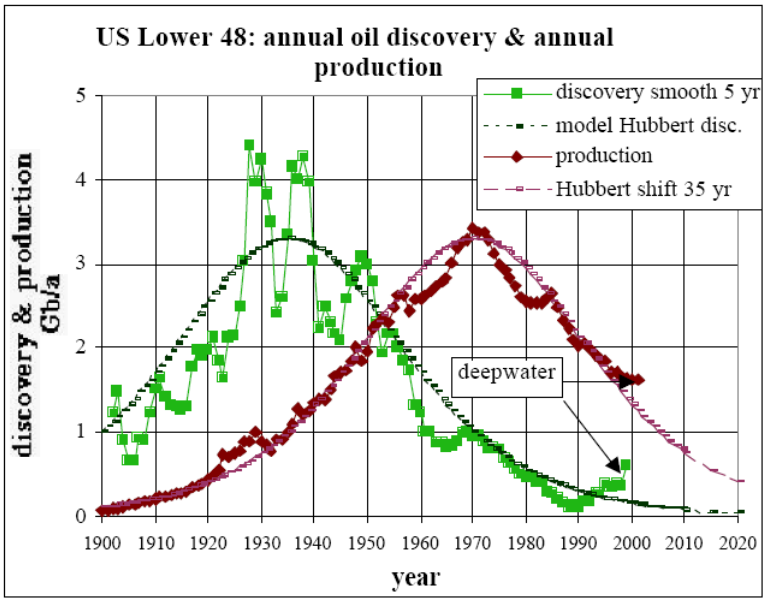


Figure 11 : Découvertes de pétrole décalées de 35 ans et production aux Etats Unis (hors Alaska) (Source : Laherrère, 2003)

En reprenant cette constatation empirique comme une routine de comportement des producteurs, nous pouvons réécrire l'équation (3.6) pour la production de pétrole, avec un changement de variable sur le temps :

$$Q(t) = Q_{\infty}.b.\frac{e^{-b(t-t_0)}}{\left[1+e^{-b(t-t_0)}\right]^2} \qquad (3.7)$$

Dans ce modèle de production, la date à laquelle se situe le « pic » de la production est fixée *ex ante* par le paramètre t_0 (le pic est atteint pour $t=t_0$) et correspond à une exploitation de la moitié des réserves totales ($Q(t_0)=Q_{\infty}/2$). La symétrie de la courbe de production découle des hypothèses implicites simplificatrices sur les stratégies de recherche et d'extraction discutées plus en détail dans Bardi (2005).

En fait, si ce modèle a démontré sa capacité prédictive pour certaines régions, en particulier pour les Etats-Unis (hors Alaska), il reste de nombreux cas dans lesquels il ne peut, sous cette forme, reproduire de façon satisfaisante les évolutions observées. Rehrl et Friedrich (2006) proposent deux explications pour ces écarts entre les prédictions de ce modèle et les observations :

- La production pétrolière observée correspond à une superposition de plusieurs cycles de Hubbert qui correspondent chacun à des processus de mise en production décalés, pour certaines catégories de réserves. C'est le cas en particulier pour la CEI et les Etats-Unis, Alaska incluse.

- La courbe de Hubbert doit être considérée comme une borne haute de la production et non pas comme une prédiction de la production effective. Cette remarque concerne

particulièrement le Moyen-Orient dont le montant des réserves très important a pour l'instant permis au producteur de ne pas être contraint par la quantité de ses découvertes (Figure 12).

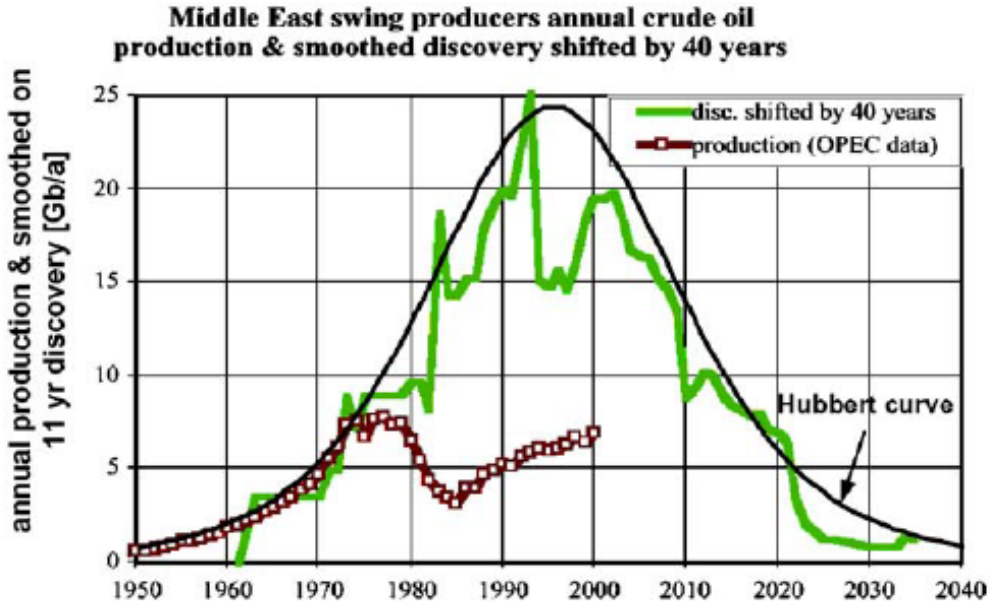


Figure 12 : Profil des découvertes de pétrole et de la-production pour le Moyen Orient et courbe de Hubbert calibrée sur les découvertes (Source : R.ehrl et Friedrich (2006))

Ces deux limites font écho aux critiques adressées au modèle physique de Hubbert par les économistes, concernant l'absence de prise en compte des signaux économiques. En effet, la simultanéité de plusieurs cycles de Hubbert dans les profils d'exploitation observés est directement liée à l'hétérogénéité des réserves de pétrole et de leur coût moyen d'exploitation. Le cycle d'exploration/prospection n'est déclenché que lorsque le prix de vente du pétrole est suffisant pour que l'investissement en vue d'exploiter de nouvelles réserves soit rentable. Le comportement de production du Moyen-Orient qui se maintient *en dessous* de sa courbe de découverte depuis le premier choc pétrolier est lié à sa position de cartel face à une frange compétitive. Une représentation plausible du marché du pétrole exige de prendre en compte ces mécanismes économiques.

1.1.3 Relier le modèle de Hubbert aux signaux économiques : l'apport du modèle LOPEX

L'originalité du modèle LOPEX (Rehrl et Friedrich, 2006) est précisément d'intégrer l'analyse de la profitabilité de l'exploitation des réserves dans le processus de décision des producteurs. Les réserves de pétrole sont divisées en plusieurs catégories elles-mêmes homogènes en termes de localisation géographique et de coût d'extraction. Par exemple, les réserves *offshores* et continentales, dont les techniques d'exploration/prospection sont très différentes, sont affectées dans des catégories de réserves différentes. Cette séparation permet de distinguer des effets d'apprentissage spécifiques à l'exploration de chaque catégorie. Une courbe de Hubbert est associée à chaque catégorie de réserve décrite dans chaque région, si bien que la production totale d'une région résulte en général de l'addition de plusieurs cycles de Hubbert. Le démarrage d'une courbe de Hubbert pour une catégorie donnée de réserve dans une région donnée dépend de la rentabilité de

son exploitation, qui est déterminée en comparant le coût d'exploitation intrinsèque à la catégorie de réserve considérée et le prix du pétrole anticipé sur le marché mondial. Enfin, pour la région du Moyen-Orient, dont la production n'est pas soumise aux contraintes de Hubbert, Rehrl et Friedrich (2006) modélisent la décision de mise en production des réserves par une optimisation intertemporelle des revenus tirés de l'exploitation du pétrole dans la région.

1.2 Introduction des courbes du Hubbert dans le modèle IMACLIM-R

Dans le modèle IMACLIM-R, l'enjeu d'une représentation fine du secteur pétrolier de l'exploration jusqu'à la formation du prix mondial du pétrole est double : d'une part être en mesure d'éclairer la question du « *peak oil* » et d'un report généralisé vers d'autres sources d'énergie primaire – le modèle doit pour cela incorporer une représentation robuste des réserves et des mécanismes de mise en production –, d'autre part intégrer les mécanismes fondamentaux de formation du prix du pétrole à long terme pour pouvoir le rendre endogène dans les simulations, ce qui constitue un point crucial dans l'étude des bénéfices attendus des politiques énergétiques ou climatiques. Le choix d'une introduction des courbes de Hubbert dans ce cadre de modélisation permet de prendre en compte la disponibilité temporelle des réserves de pétrole, qui pèse fortement sur la formation des prix. Ce choix de modélisation permet aussi d'éviter le recours à une courbe d'offre agrégée, qui peut représenter l'élévation des coûts de production du pétrole avec l'épuisement des réserves mais néglige les contraintes de débit qui pèsent sur l'exploitation des réserves disponibles.

1.2.1 Désagrégation des réserves de pétrole

Les valeurs associées aux réserves de pétrole récupérables varient fortement dans la littérature d'une source à l'autre. Cette incertitude provient à la fois de la difficulté d'apprécier le montant total de pétrole disponible dans le sous-sol continental et océanique et de la difficulté d'apprécier la fraction de ce pétrole qui pourra un jour être exploité. Dans IMACLIM-R, nous considérons les réserves de pétrole conventionnel et non conventionnel en excluant les schistes bitumineux dont le processus d'extraction et de transformation correspond plus à une exploitation minière avec fabrication de carburants synthétiques qu'à une extraction d'hydrocarbures liquides. Nous avons retenu, dans le calibrage par défaut du modèle, l'évaluation des réserves régionales de pétrole fournie par l'USGS, résumée dans le

Tableau 4.

	Réserves déjà extraites en 2001	Réserves récupérables en 2001				
		Pétrole conventionnel		**Pétrole non conventionnel (pétroles extra-lourds et sables asphaltiques)**		
		Moyen-Orient.	Reste du Monde	Canada	Amérique du sud	Reste du monde
Quantité (Gtep)	122	140	161	30	67	67

Tableau 4 : Réserves de pétrole ultimement exploitables en 2001

Pour désagréger les réserves régionales en différentes catégories de coûts, nous avons utilisé les résultats du projet européen SAUNER[19] qui a effectué un recensement des évaluations de coûts et de réserves dans la littérature spécialisée. Dans chaque région, les réserves disponibles sont décomposées en neuf catégories de coûts, au sein desquelles sont distinguées les ressources conventionnelles et non conventionnelles (Figure 13).

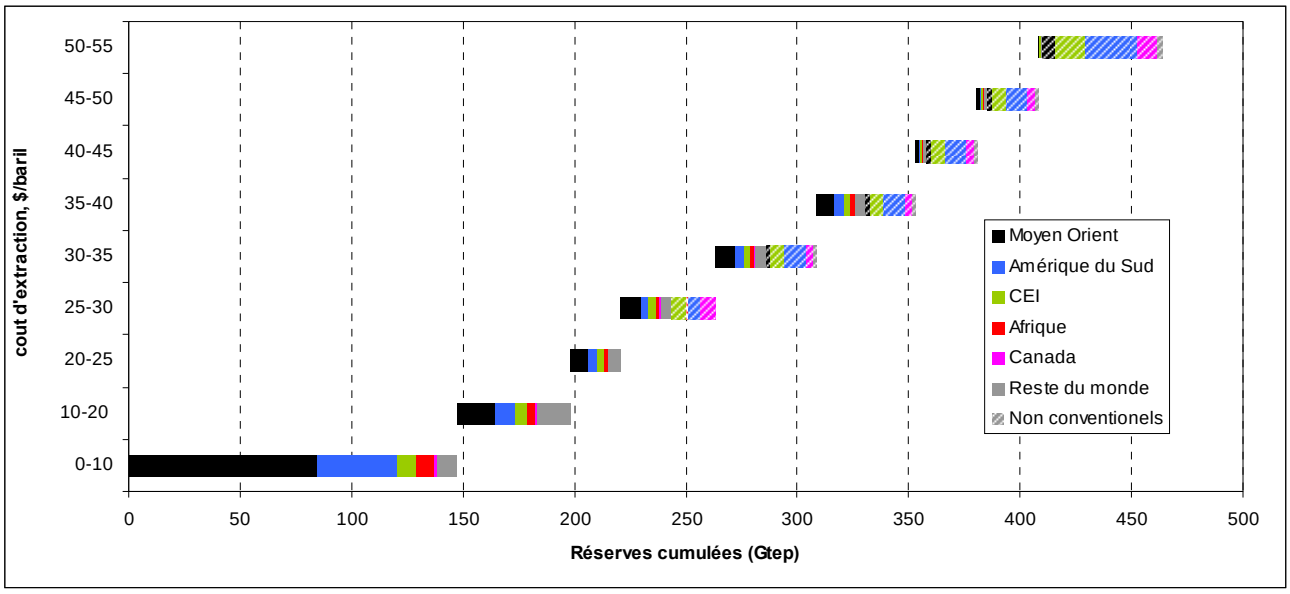


Figure 13 : Classification des réserves de pétrole par région et catégorie de coût d'extraction.

[19] *Sustainability and the Use of Non-rEnewable Resources*, Projet de recherché européen, financé par la DG XII dans le 4ème programme *Energie Environnement et Développement soutenable*. http://people.bath.ac.uk/hssam/sauner/

1.2.2 Courbes de Hubbert et capacités de production

Pour chaque catégorie de ressource *j*, dans chaque région *k*, le développement des capacités de production suit une courbe de Hubbert définie dans l'équation (3.8).

$$Cap_{k,j}^{pétrole}(t) = Cap_0^{k,j}.b_{k,j}.\frac{e^{-b_{k,j}(t-t_0^{k,j})}}{\left[1+e^{-b_{k,j}(t-t_0^{k,j})}\right]^2} \quad (3.8)$$

Le paramètre $b_{k,j}$ représente la pente de la courbe de Hubbert associée à la catégorie de pétrole considérée. Rehrl and Friedrich (2006) estiment ce paramètre à *b=0.061/an* pour toutes les catégories conventionnelles quelle que soit la région, grâce à une régression sur les données des productions non-OPEP sur la période 1980/1998. Nous ne disposons en revanche d'aucune donnée pour les catégories non conventionnelles, du fait que celles-ci ont été peu exploitées pour l'instant. Les valeurs de *b* adoptées pour ces catégories peuvent constituer une variable de scénario, et une valeur de *b* plus faible suppose implicitement des inerties plus fortes dans le déploiement des capacités. Par défaut, nous prenons la même valeur que pour les ressources conventionnelles.

Les paramètres Cap_0 et t_0 sont des paramètres propres à chaque catégorie, calibrés en fonction de la quantité de réserve, de la production initiale et de la date de début de mise en production. Pour chaque catégorie, la courbe passe par un maximum de $(Cap_0.b)/4$ à la date t_0.

En suivant une courbe de Hubbert, les capacités de production de chaque catégorie limitent le niveau de production effective *Q,* qui dépend de l'état courant de l'équilibre entre l'offre et la demande. Il peut arriver que le niveau de production soit durablement plus bas que le niveau des capacités suivant la courbe de Hubbert, puisque la structure de l'équilibre statique dans IMACLIM-R permet une sous-utilisation des facteurs de production en fonction du contexte économique. Cette éventualité nécessite de modifier l'évolution des capacités pour prendre en compte la dynamique de production effective.

- Dans la phase ascendante de la courbe de Hubbert, une sous-utilisation des ressources implique que la capacité de production décrite par l'équation (3.8) atteindra son maximum *avant* que la moitié du pétrole présent avant extraction dans la catégorie de réserve correspondante n'ait été effectivement exploitée. Dans ce cas, la capacité va plafonner à son maximum jusqu'à ce qu'il ne reste plus dans le sol que la moitié de la réserve initiale. Au-delà, la phase descendante de la courbe s'amorce.

- Dans la phase descendante de la courbe de Hubbert, une sous-exploitation des capacités va permettre d'étaler l'effet de déplétion sur la durée. A chaque date, si l'exploitation effective s'avère plus lente que la décroissance de la capacité prescrite par la courbe de Hubbert, telle qu'elle était initialement calibrée, le module dynamique re-calibre la courbe de Hubbert qui passe par la valeur courante des capacités et dont la surface sous la « queue » correspond à la quantité restante de pétrole exploitable (Figure 14).

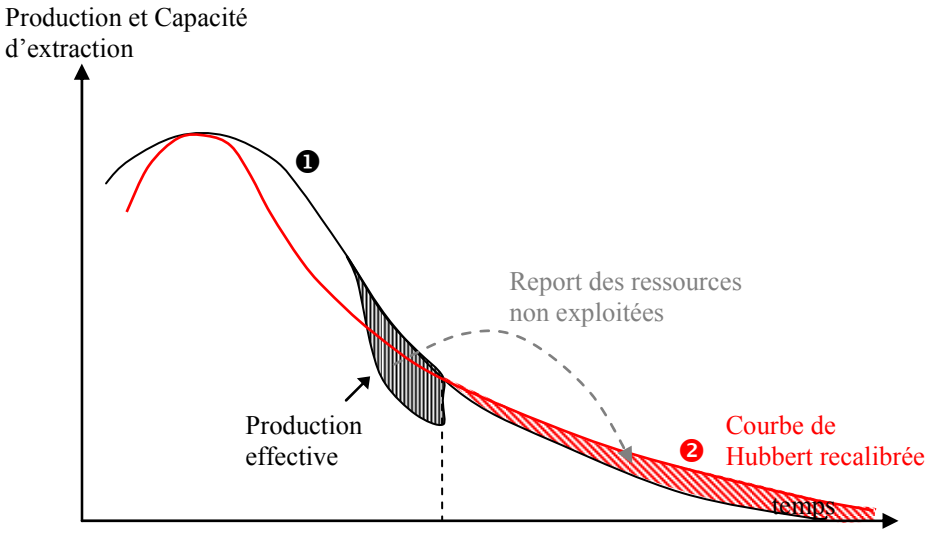


Figure 14 : Recalibrage de la courbe de Hubbert des capacités en cas de sous-exploitation

1.2.3 Comportement des producteurs

Dans chaque région, un producteur représentatif possède l'ensemble des réserves pétrolières et décide de la mise en production de ces réserves, sous la contrainte, pour chaque catégorie de pétrole, de la limite imposée par la disponibilité temporelle de cette réserve (sa courbe de Hubbert). Le principal levier d'action d'un producteur correspond à la liberté de décider de la date de démarrage de l'exploitation des catégories de réserves qu'il possède. Nous distinguons deux catégories de producteurs dont le comportement diffère à cause de leurs positions différentes sur le marché :

- Les « ***fatal producers*** » n'ont pas de pouvoir de marché, ils ne peuvent pas influencer l'évolution du prix mondial du pétrole et s'adaptent aux cours mondiaux. Cette catégorie regroupe toutes les régions du monde sauf le Moyen-Orient. Dans ces régions, si une catégorie de pétrole devient rentable, c'est-à-dire si le prix mondial de vente est supérieur au coût d'extraction/exploration associé, le producteur décide de mettre en production cette catégorie de réserve et la capacité de production associée à cette catégorie débute un cycle de Hubbert[20]. Ce schéma de décision s'applique simultanément à chaque catégorie de réserve dont dispose chaque producteur représentatif et la capacité régionale de production pétrolière est obtenue par simple sommation. La Figure 15 fournit une illustration de la mise en production, pour une région hypothétique, de quatre catégories de réserves associées à une évolution donnée du prix du pétrole. Le graphe de gauche représente l'évolution temporelle des capacités de production de chaque catégorie, dont la date de début de mise en production est liée à la hausse du prix mondial du pétrole. Le graphe de

[20] Si le prix mondial baisse, la catégorie considérée devient moins rentable, mais nous supposons que le producteur maintient constant son rythme de production pour couvrir ses coûts fixes et parce que la remise en service d'une nappe dont l'exploitation a été interrompue a un coût élevé. Dans ce cas là, la courbe de Hubbert est recalibrée comme dans la Figure 14 pour conserver la cohérence de la quantité totale de ressources.

droite représente l'évolution de la capacité totale de production de la région qui correspond à la somme des capacités associées à chaque catégorie de réserve.

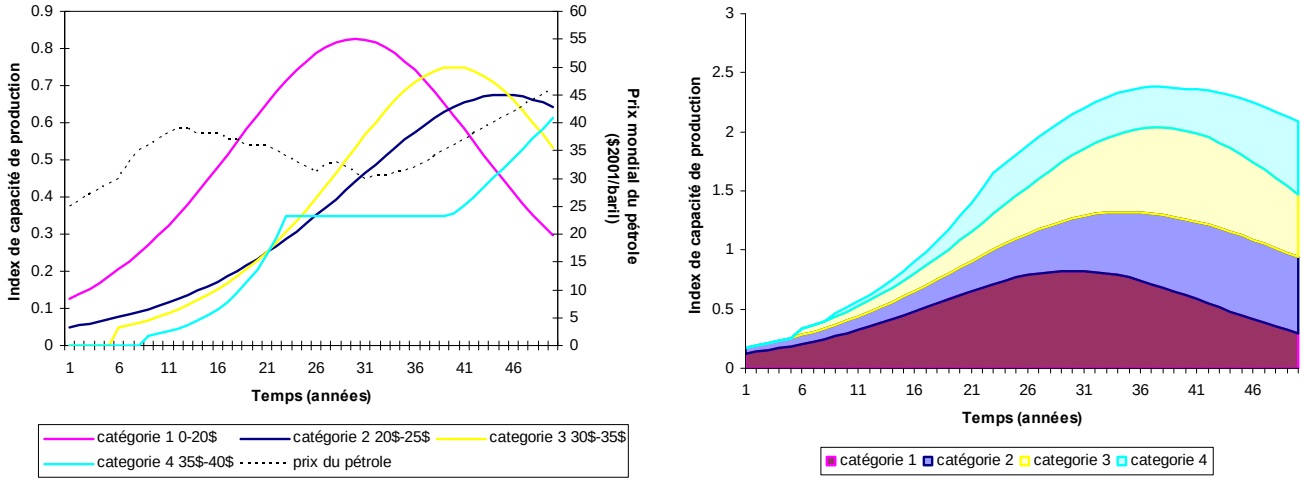


Figure 15 : Exemple d'évolution des capacités de production d'une région

- Le producteur représentatif de la région Moyen-Orient est supposé jouer le rôle de « ***swing producer*** » : son pouvoir de marché lui permet d'influencer le prix mondial du pétrole *via* le niveau de sa production, d'une part parce qu'il peut ralentir le rythme de l'exploitation de ses réserves – certains pays « rentiers » à population relativement faible peuvent accepter une moindre croissance de leurs recettes –, d'autre part parce qu'il est peu contraint par sa courbe de Hubbert étant donné le niveau très important de ses réserves. Logiquement, ce pouvoir de marché ne perdure que jusqu'à ce que la moitié des réserves initiales de la région aient été exploitées, l'effet de déplétion devient alors contraignant pour cette région. En formulant des anticipations adaptatives sur l'évolution de la demande totale, le producteur représentatif du Moyen-Orient peut choisir le niveau de production qui maximise son revenu espéré ou qui permet de respecter un objectif de prix par exemple. Nous supposons dans les simulations qui suivent que l'OPEP cherche à maintenir le cours du pétrole en dessous de 70 US$ par baril sur plusieurs années, surtout afin de préserver la compétitivité du pétrole par rapport aux carburants alternatifs, qui deviennent rentables aux alentours de 100 US$ par baril.

1.2.4 La formation des prix du pétrole

Le prix du pétrole qui se forme dans l'équilibre statique reflète le niveau de tension entre offre et demande. Le prix de marché est relié à l'équation (2.9), avec la particularité propre au secteur pétrolier que le taux de marge est variable dans l'équilibre statique et dépend du taux d'utilisation des capacités de production correspondantes. L'équation de formation des prix devient donc :

$$\mathrm{p_{k,oil}} = \sum_j \mathrm{pIC_{j,oil,k}} \cdot IC_{j,oil,k} + \left(\Omega_{\mathrm{k,oil}} \left(\frac{\mathrm{Q_{k,oil}}}{Cap_{k,oil}} \right) \cdot \mathrm{w_{k,oil}} \right) \cdot l_{k,oil} \cdot (1 + tax^{w}_{k,oil}) + \pi_{k,oil} \left(\frac{\mathrm{Q_{k,oil}}}{Cap_{k,oil}} \right) \cdot \mathrm{p_{k,oil}} \qquad (3.9)$$

où $\pi_{k,oil} \left(\frac{\mathrm{Q_{k,oil}}}{Cap_{k,oil}} \right)$ est une fonction strictement croissante.

Les prix régionaux correspondent ainsi à l'addition du coût de production moyen régional et d'une marge qui encapsule à la fois une rente Ricardienne et une rente de rareté. Cette équation est utilisée par le « *swing producer* » pour anticiper le niveau de ses capacités qui lui permettra d'atteindre son objectif, à partir de projections de la demande totale de pétrole et de la production des autres régions.

2 Traitement des autres combustibles fossiles

Les réserves de charbon et de gaz sont *a priori* soumises à des contraintes de disponibilité moins importantes que le pétrole brut. Dans la version actuelle du modèle, le traitement de l'évolution des capacités de production de ces deux secteurs ainsi que des mécanismes de formation des prix sont traités plus simplement.

2.1 Production de gaz naturel et formation des prix

L'évolution des capacités de production mondiale de gaz répond à la croissance de la demande tant que les réserves disponibles n'entrent pas dans un processus de déplétion. La répartition des capacités de production régionales s'effectue à l'aide d'une clé de répartition exogène, évoluant dans le temps, calibrée sur les sorties du modèle énergétique POLES (LEPII-EPE, 2006). Les résultats de ce modèle tiennent compte de la disponibilité des réserves et des facilités de production dans chaque région.

L'évolution du prix du gaz est indexée sur celle du pétrole *via* un coefficient d'indexation décroissant calibré sur les résultats du World Energy Model (AIE, 2007). Cette indexation disparaît lorsque les prix du pétrole dépassent 80 $ le baril ; au-delà, les prix du gaz restent seulement gouvernés par l'évolution des coûts de production puis éventuellement par le phénomène de déplétion qui conduit à une forte hausse du prix en raison d'une augmentation de la marge des producteurs possédant les réserves restantes.

A court terme, la formation des prix du gaz est liée à l'équilibre offre demande au sein de chaque équilibre statique. Les variations de prix peuvent refléter des ajustements non optimaux des capacités existantes à une évolution mal anticipée de la demande. A long terme, la hausse des coûts de production, l'indexation sur les prix du pétrole ou le phénomène de déplétion se traduisent, dans le module dynamique dédié, par la modification des coefficients unitaires de consommations intermédiaires régionaux du secteur gazier et des taux de marges appliqués par les producteurs.

2.2 Production de charbon et formation des prix

Compte tenu des évaluations de réserves dont nous disposons (Rogner, 1997), la déplétion des ressources mondiales de charbon n'est pas susceptible d'induire une baisse tendancielle de la production à l'horizon du 21ème siècle. Par ailleurs, la qualité du charbon disponible et les coûts de production sont très variables d'un gisement à un autre. Pour traduire l'évolution du prix du charbon, nous avons à nouveau recours à des formes réduites calibrées sur les résultats du modèle POLES. Ces fonctions donnent la répartition régionale des capacités de production ainsi que l'évolution des coûts, en fonction des volumes de production cumulés.

3 Transformation énergétique : offre alternative de carburants liquides

La description de filières alternatives de production de carburants liquides est cruciale pour projeter l'approvisionnement énergétique futur si des politiques climatiques sont mises en œuvre ou en cas de tensions associées à la déplétion des réserves pétrolières. Cela concerne particulièrement les transports routiers et aériens qui utilisent aujourd'hui principalement des moteurs à combustion interne alimentés par des carburants liquides issus du raffinage du pétrole. Dans ce secteur, il existe deux pistes majeures de changement technique : l'utilisation de carburants liquides provenant d'autres sources que le pétrole – c'est l'objet de cette partie – et le recours à d'autres motorisations – évolution que nous traitons dans la section 5.3.

Nous décrivons ici le fonctionnement du module dynamique qui gouverne la pénétration des carburants alternatifs sur le marché des carburants liquides. Nous considérerons que ces carburants sont des substituts parfaits aux carburants issus du raffinage du pétrole brut, aujourd'hui massivement utilisés dans le secteur des transports. Dans IMACLIM-R, le secteur *Energie transformée* produit l'ensemble des carburants liquides ; à l'année de référence, l'ensemble de la production provient du raffinage du pétrole brut ; au cours de la trajectoire, il va produire les carburants alternatifs lorsque ceux-ci deviendront rentables. Le module dynamique dédié aux carburants de synthèse prend en charge (i) l'évolution des parts de chaque filière au sein du secteur *Energie transformée*, (ii) l'évolution de la structure de coût du secteur, moyenne pondérée des structures de coûts de chaque filière mise en œuvre (3.10), (iii) l'évolution des coefficients d'émissions de GES correspondant au secteur en fonction des filières qui le composent.

La version actuelle du modèle prend en compte trois filières de production de carburants alternatifs : biocarburants filière éthanol, biocarburants filière biodiesel, carburants de synthèses par liquéfaction du charbon (que nous noterons dans la suite CTL pour *Coal To Liquid*).

$$\begin{aligned} Cost_struct_{k,Et} = {} & Cost_struct_{k,Oil_refined}.share_liqufuel_{k,Oil_refined} + \ldots \\ & Cost_struct_{k,Ethanol}.share_liqufuel_{k,Ethanol} + \ldots \\ & Cost_struct_{k,Biodiesel}.share_liqufuel_{k,Biodiesel} + \ldots \\ & Cost_struct_{k,CTL}.share_liqufuel_{k,CTL} \end{aligned} \qquad (3.10)$$

Les coefficients techniques de la structure de production du secteur *Energie transformée* ($Cost_struct_{k,Et}$) – les consommations intermédiaires unitaires $IC_{i,Et,k}$, le besoin unitaire de travail $l_{k,Et}$ et le taux de marge unitaire $\pi_{k,Et}$, les coefficients d'émission par unité de carburant liquide produit – sont obtenus par pondération des coefficients techniques des différentes filières. Ces coefficients techniques de filière (indicées *Oil_refined, Ethanol, Biodiesel* et *CTL*) sont calibrés sur des informations tirées de modèles technologiques sectoriels ou d'études de prospective technologique (AIE, 2006). Les parts de marché *share_liqufuel* (*Ethanol, Biodiesel* et *CTL*) des carburants alternatifs dans le panier régional des produits raffinés dépendent de leurs coûts relatifs et des contraintes qui s'appliquent à leur production. La part de marché de la filière classique de raffinage du pétrole brut résulte directement de l'évolution des capacités de production pétrolière.

3.1 Biocarburants

3.1.1 Part de marché et contraintes d'offre

Les deux catégories de biocarburants présentes dans IMACLIM-R, l'éthanol et le biodiesel, sont toutes deux utilisables directement dans les véhicules à combustion interne en les mélangeant respectivement dans l'essence et le diesel, jusqu'à certaines proportions. La production de ces biocarburants est soumise à une contrainte globale en amont, relative à la disponibilité des terres agricoles. L'architecture d'IMACLIM-R est destinée à encapsuler un modèle compact d'usage des sols qui permettra d'expliciter d'un côté l'évolution des rentes foncières provoquées par les compétitions entre usages des sols, de l'autre les arbitrages de production des agriculteurs. Dans l'état d'avancement du modèle actuel, ce module est simplement remplacé par des courbes d'offres pour la production d'éthanol et de biodiesel (Figure 16). Ces courbes sont calibrées sur les résultats de modélisations sectorielles (AIE, 2006) : elles ont été interpolées pour intégrer dans le modèle IMACLIM-R un continuum annuel de courbes entre 2001 et 2100. Comme le montre la Figure 16, les potentiels de production augmentent au cours du temps, simultanément à une baisse des coûts, grâce à des progrès techniques continus. Ces augmentations des potentiels de production sont principalement dues à l'arrivée à maturité, à moyen terme, de technologies dites de seconde génération : la filière ligno-cellulosique pour l'éthanol et la filière de liquéfaction de la biomasse pour le biodiesel. Ces nouvelles filières vont considérablement modifier la géographie de la production de biocarburants dans la mesure où des potentiels de production à grande échelle et à coût raisonnable vont apparaître dans les pays tempérés alors qu'ils étaient auparavant réservés aux régions tropicales avec la production d'éthanol à partir de canne à sucre en particulier.

La pénétration des biocarburants sur le marché des carburants liquides est fonction de leur compétitivité et de leur disponibilité ; elle est calculée en égalisant le coût marginal de production de chaque type de biocarburant et le prix du carburant issu de la filière « classique » de raffinage du pétrole brut, augmenté d'une éventuelle taxe carbone en cas de politique climatique. En reportant ce prix complet sur l'axe vertical des courbes de la Figure 16, on obtient les capacités de production d'éthanol et de biodiesel. La ventilation de la production globale dans les régions du modèle est effectuée selon deux clés de répartition spécifiques.

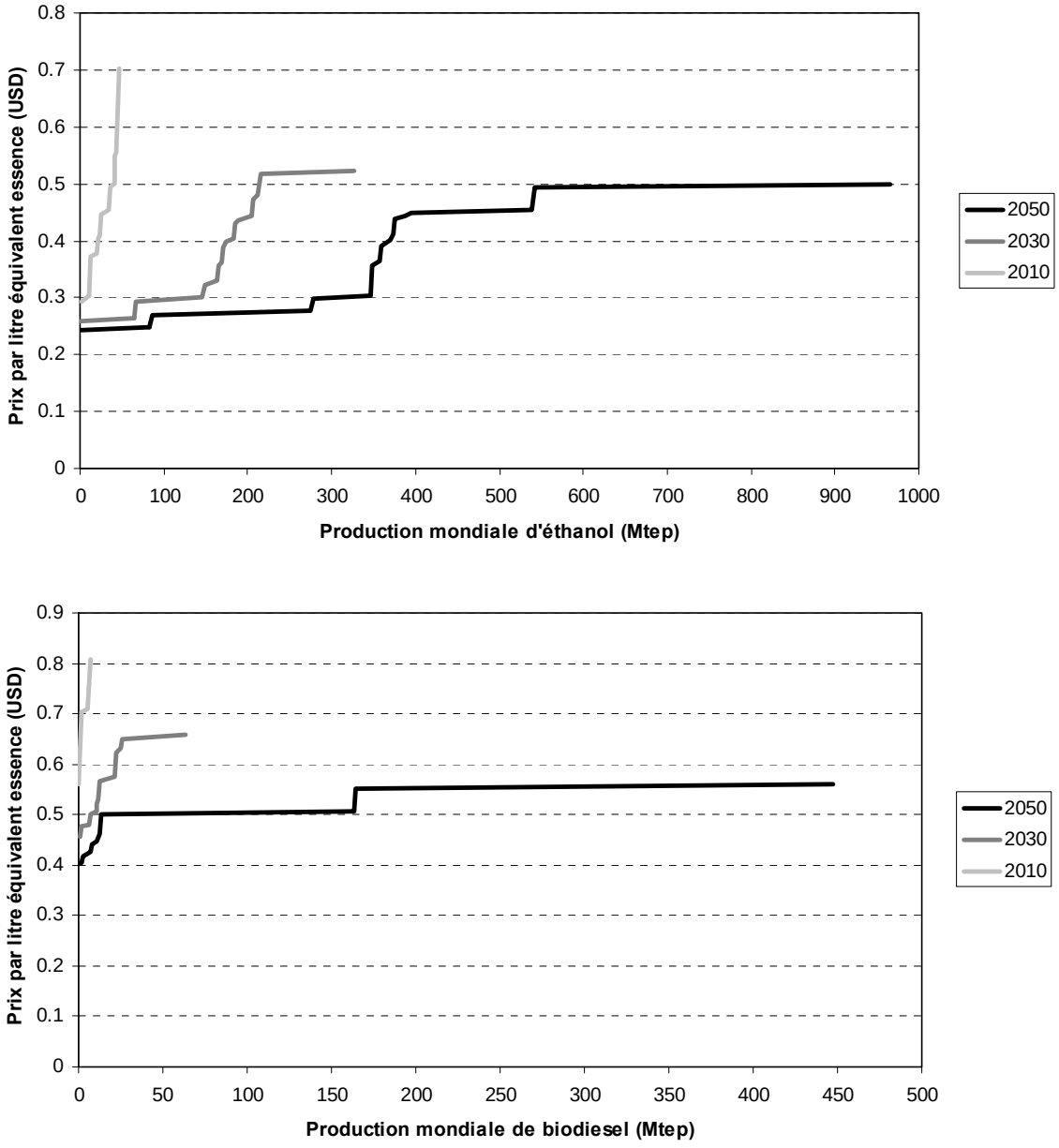


Figure 16 : Evolution des courbes d'offre mondiales pour la production d'éthanol et de biodiesel au cours du temps, source AIE (2006).

3.1.2 Formation du prix et structure de coût

L'évolution de la part des filières biocarburants dans la de production de carburants liquides induit automatiquement une évolution de la structure de coût globale du secteur, *via* une nouvelle pondération des structures de coûts des différentes filières. Les structures de coût des deux filières biocarburants sont reconstituées à partir de leur prix de vente, égal au prix du carburant provenant du raffinage de pétrole brut. Nous supposons, dans cette version du modèle, que l'ensemble du revenu tiré de la vente des biocarburants est alloué à la consommation intermédiaire de bien issu du secteur de production et de transformation agricole. Cette hypothèse néglige la structure de coût du *raffinage* des biocarburants, qui doit être mieux représentée dans une version ultérieure du modèle, mais elle permet déjà de représenter :

- Le transfert de revenu vers le secteur agricole associé à la production de biocarburants ;
- La prise en compte des consommations d'énergie intermédiaires nécessaires à la production des végétaux entrant dans la composition des biocarburants, *via* la consommation induite de biens agricoles.

3.2 Carburants synthétiques

Dans IMACLIM-R, la production de carburants synthétiques à partir d'hydrocarbures se limite à la liquéfaction du charbon ; la liquéfaction du gaz ou l'extraction des schistes bitumineux sont négligés. Ces trois filières ont en commun leurs faibles rendements de production et des émissions importantes de CO_2 pendant la transformation ou la production. La ressource en gaz est supposée être affectée en totalité à des usages de combustion directe plus efficaces. L'extraction de schistes bitumineux n'est pas envisagée à cause de son impact sur l'environnement et de sa très faible efficacité.

Les caractéristiques technologiques de la liquéfaction du charbon sont tirées de l'étude ETP (AIE, 2006). Le rendement de conversion énergétique entre le charbon et le carburant synthétique obtenu est supposé égal à 50%. Le contenu carbone par tonne équivalent pétrole de ce carburant est supposé être identique à celui du carburant issu du raffinage du pétrole. Mais la combinaison du faible rendement énergétique et de la différence entre le contenu carbone du charbon et celui des carburants liquides, par unité d'énergie, fait que les deux tiers du carbone initialement contenu dans le charbon sont émis lors du processus de liquéfaction (AIE, 2006) ; le reste est émis lors de la combustion du carburant lors de son usage final. Les émissions liées au processus de liquéfaction ont la possibilité d'être séquestrées en cas d'émergence d'un prix du carbone élevé.

Le développement de cette filière de production dépend de sa rentabilité face aux carburants liquides issus du raffinage du pétrole : la liquéfaction devient rentable lorsque le prix du pétrole atteint 100 $ le baril.

La structure de coût de production de cette technologie est simplifiée : elle est constituée essentiellement d'un coefficient technique de consommation unitaire de charbon valant 2 (car le rendement énergétique vaut 0.5) et d'un taux de marge adapté pour obtenir un coût total de production du carburant synthétique égal à celui du carburant issu du raffinage d'un pétrole à 100 $ le baril. L'importance du taux de marge dans la structure de coût reflète le caractère fortement capitalistique des installations de liquéfaction du charbon.

4 Génération d'électricité : Prise en compte des contraintes de la courbe de charge

Le secteur de la production d'électricité est particulièrement concerné par les politiques de réduction des émissions puisqu'il est le premier secteur émetteur, responsable en 2004 de 20% des émissions mondiales des 6 gaz couverts par le protocole de Kyoto, avec des émissions en croissance de 53% entre 1990 et 2004, pour atteindre 10.7 Gt CO_2 en 2004. Ces émissions sont directement liées à la combustion des ressources fossiles – charbon, pétrole, gaz – dans les centrales thermiques.

La particularité de la gestion des capacités de production et des choix technologiques dans le secteur électrique provient du caractère difficilement stockable de l'électricité. Sur un réseau de transport et de distribution d'électricité, il est nécessaire d'assurer en permanence un équilibre physique entre la puissance mise à disposition sur le réseau et la puissance demandée par la somme des usages finaux. La production doit donc s'adapter aux larges fluctuations journalières et saisonnières de la demande sur le réseau[21]. Or la rentabilité des technologies de production – dit autrement, le coût complet de production au kWh – dépend du temps d'opération annuel, compte tenu de l'hétérogénéité des coûts fixes et variables pour chaque technologie, ainsi que des contraintes techniques de mise en opération des unités de production. En fait, tant les choix d'investissement à long terme que les choix d'ordre de mise en production des capacités existantes sont dépendants de la courbe de charge du réseau, courbe qui indique au cours du temps l'évolution de la puissance appelée sur le réseau.

L'enjeu de l'hybridation *top-down* / *bottom-up* est ici particulièrement palpable : sans la contrainte physique et temporelle de la courbe de charge du réseau, le choix des moyens de produire de l'électricité pourrait être simplement orienté vers la technologie la moins coûteuse, en tenant éventuellement compte d'autres contraintes (acceptabilité sociale, risque d'investissement, taille des unités de production, structure de marché, etc.). Mais compte tenu de cette courbe de charge, la représentation des choix d'investissement et des choix de mise en opération des capacités existantes ne peut pas faire l'économie d'une complexité minimale, c'est-à-dire :

- une représentation détaillée des grands types de technologies, qui puissent être distinguées par leurs caractéristiques de coûts et leurs propres contraintes physiques ou socio-économiques (technologies de base/de pointe, potentiel limité, acceptabilité, etc.) ;
- une représentation explicite de la courbe de charge et de son évolution au cours du temps ;
- une procédure d'optimisation des investissements, dépendante de la courbe de charge future et des anticipations de prix et de demande à long terme ;
- une procédure de choix de mise en production des capacités existantes en fonction de la courbe de charge et des prix courants des énergies primaires.

Nous décrivons en détail chacun de ces éléments dans les quatre sous-sections suivantes.

[21] Face à l'incertitude de la demande future effective, des pannes possibles et de l'intermittence de certains moyens de production (renouvelables), un producteur centralisé doit arbitrer entre un niveau de risque de coupure et la construction de surcapacités de précaution. Lorsque le marché de l'électricité est libéralisé, ce contrôle de l'évolution des capacités est rendu plus difficile, sauf si l'un des producteurs pèse suffisamment lourd pour assurer l'ajustement des capacités totales aux besoins de l'économie (e.g. EDF en France).

4.1 Des technologies de production explicites détaillées en génération de capital

La description des technologies repose sur un ensemble discret de 13 technologies, dont les caractéristiques évoluent dans le temps grâce au progrès technique. Le niveau de détail des technologies de production électrique a été déterminé par un arbitrage entre la nécessité d'intégrer des informations précises venant des modèles sectoriels ou des dires d'expert du secteur et la maîtrise de la complexité du modèle et des quantités de données nécessaires à son calibrage. Les technologies représentées dans le modèle incluent non seulement les technologies directement utilisables aujourd'hui mais aussi celles dont la maturité opérationnelle interviendra plus tard dans le temps, comme par exemple les technologies utilisant le captage et stockage du CO_2. Parmi les 13 technologies représentées, il y a en fait dix technologies différentes, mais trois d'entre elles peuvent en plus être utilisées avec un système de captage et stockage du CO_2.

Chacune des 13 technologies représentées est caractérisée par un jeu de paramètres technico-économiques qui permettent de calculer le coût moyen de production actualisé par kilowattheure produit. Ces paramètres comprennent : le coût en capital (dollars par kilowatt installé), l'efficacité énergétique (en pourcentage, pour les technologies fonctionnant à partir de combustibles fossiles), les coûts d'exploitation et de maintenance, fixes ou variables (respectivement en dollars par kilowatt et en dollars par kilowattheure) et un coefficient d'actualisation qui incorpore à la fois le coût d'opportunité du capital et un facteur de risque très dépendant de la technologie envisagée. Ce facteur de risque peut couvrir autant l'évaluation objective du risque de défaut que l'évaluation du risque social, par exemple dans le cas du nucléaire ou de la séquestration du CO_2. Les paramètres technico-économiques associés à chaque technologie sont soit calibrés sur des modèles technologiques sectoriels (par exemple le modèle POLES), ou bien sur des informations provenant de la littérature (Grübler et *al.*, 2002 ; Rao et *al.*, 2006 ; Sims et *al.*, 2007). Le Tableau 5 fournit les valeurs de calibrage des paramètres technico-économiques caractérisant les 13 technologies décrites dans cette version du modèle, pour les Etats-Unis. Les quatre dernières lignes contiennent les résultats du calcul, pour chaque technologie à l'année de calibrage, des différentes composantes du coût moyen de production actualisé – coût d'investissement, coût d'exploitation et de maintenance, coût de combustible – pour une durée d'utilisation annuelle de 8760 heures.

Les caractéristiques des technologies aujourd'hui pas encore matures peuvent évoluer très largement dans le temps, grâce à un processus d'apprentissage, représenté soit comme une évolution autonome, soit comme un mécanisme endogène (voir section 6). Par exemple, le rendement de la production d'électricité à partir de charbon peut être particulièrement amélioré grâce à des technologies avancées telles que les centrales à cycle supercritique ou à gazéification.

Paramètre	Notation dans les équations	Unité	Fioul	Gaz naturel			Charbon					Nucléaire	Renouvelables		
				Cycle simple	Cycle combiné	Cycle combiné avec CCS	Thermique	Super critique	Super critique avec CCS	Gazéification du charbon puis cycle combiné	Gazéification du charbon puis cycle combiné avec CCS		Hydraulique	Eolien onshore	Eolien offshore
Opérationnel à l'année de calibrage			oui	oui	oui	non	Oui	non	non	non	non	oui	oui	oui	non
Coût d'investissement	*CINV_kW*	$ 2001/kW	1000	400	500	1120	1050	1600	2700	1500	2400	2600	2000	1400	1800
Coûts d'opération et maintenance fixes	*OM_Cost_fixed*	$ 2001/kW	15	26	10	50	53	35	60	37	70	58	20	50	50
Durée de vie	*life_time*	Années	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	45	20	20
Taux d'actualisation	*disc*	%	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Coûts d'opération et maintenance variables	*OM_Cost_var*	$ 2001/kWh	0.0017	0.0014	0.0014	0.0022	0.0024	0.0028	0.0034	0.0024	0.0029	0.0012			
Prix du combustible (exemple USA 2001)		$ 2001/Tep	237	160	160	160	71	71	71	71	71				
Efficacité énergétique	*rho_elec*	%	36	35	53	47	35	45	35	42	36				
Taux de disponibilité		%	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	20	24
Coût moyen d'investissement actualisé		$ 2001/MWh	12.1	4.8	6.1	13.6	12.7	19.4	32.7	18.2	29.1	31.5	23.1	93.9	100.6
Coût moyen de combustible actualisé		$ 2001/MWh	56.6	39.3	26.0	29.3	17.4	13.6	17.4	14.5	17.0	5.0	0.0	0.0	0.0
Coût moyen d'exploitation et de maintenance actualisé		$ 2001/MWh	5.3	3.0	1.5	6.1	6.1	4.0	14.1	4.2	17.0	7.8	2.3	28.5	23.8
Coût moyen de production actualisé		$ 2001/MWh	**74.0**	**47.1**	**33.5**	**48.9**	**36.2**	**36.9**	**64.2**	**36.9**	**63.0**	**44.3**	**25.4**	**122.4**	**124.3**

Tableau 5 : Paramètres technico-économiques pour les technologies de production électrique pour la région des Etats Unis en 2001. Les coûts moyens actualisés sont calculés pour une durée d'utilisation de 8760 heures. Certaines technologies sont disponibles avec ou sans capture et séquestration du carbone (CCS)

Les données du Tableau 5 correspondent aux caractéristiques des technologies à l'année de calibrage du modèle pour celles qui sont techniquement disponibles à ce moment là et à la date de maturité technique pour les autres. Elles ne correspondent cependant pas aux caractéristiques moyennes des parcs de production installés dans chaque région à l'année de calibrage, puisque les parcs existants incluent des capacités de production anciennes moins efficaces. De même dans le futur, les caractéristiques moyennes du parc installé seront une moyenne pondérée des caractéristiques techniques des différentes générations de capacités installées et encore en opération. Comme dans le secteur *industrie* regroupant les industries grandes consommatrices d'énergie, l'inertie des équipements et le caractère encapsulé des technologies sont représentés à travers un suivi des générations de capital et de leurs caractéristiques technologiques.

Ainsi, chaque unité de capacité de production d'une technologie donnée construite à la date t est active jusqu'à l'année $t+life_time_{k,TECH}$, où $life_time_{k,TECH}$ est la durée de vie associée à la technologie *TECH* dans la région k. La totalité du parc de production à la période t se décompose donc selon les tranches d'année de mise en service et ensuite en fonction des technologies de production utilisées. Nous notons $Cap_MW_{k,TECH}^{vintage}(i)$ la capacité de production fondée sur la technologie *TECH* et installée à l'année i dans chaque région k[22]. Pour chaque technologie de production *TECH*, et chaque région k, la capacité de production électrique (mesurée en puissance, en mégawatts) s'obtient en sommant les générations de capital en activité :

$$Cap_elec_MW_{k,TECH}(t) = \sum_{i=1}^{life_time_{k,TECH}} Cap_MW_{k,TECH}^{vintage}\left(t+i\right) \qquad (3.11)$$

A chaque année t, les capacités de production qui arrivent en fin de vie – la durée de vie variant selon le type de technologie – sont mises au rebut. On obtient alors un parc de production déprécié $Cap_MW_depreciated_{k,TECH}$, avant que soit déterminé le nouvel investissement de l'année courante pour obtenir le parc de production de la période $t+1$:

$$Cap_MW_depreciated_{k,TECH}(t) = \sum_{i=2}^{life_time_{k,TECH}} Cap_MW_{k,TECH}^{vintage}\left(t+i\right) \qquad (3.12)$$

La capacité de la nouvelle génération de capital $Cap_MW_{k,TECH}^{vintage}(t+life_time_{k,TECH}+1)$ et son contenu technologique seront ensuite déterminés par la procédure de choix des investissements.

[22] A l'année de référence qui sert de point de départ des simulations (2001), le calibrage des générations de capital et de leurs caractéristiques techniques est réalisé de manière à maintenir la cohérence entre les capacités de production installées dans chaque région et les statistiques de consommation du secteur électrique fournies par les matrices énergétiques.

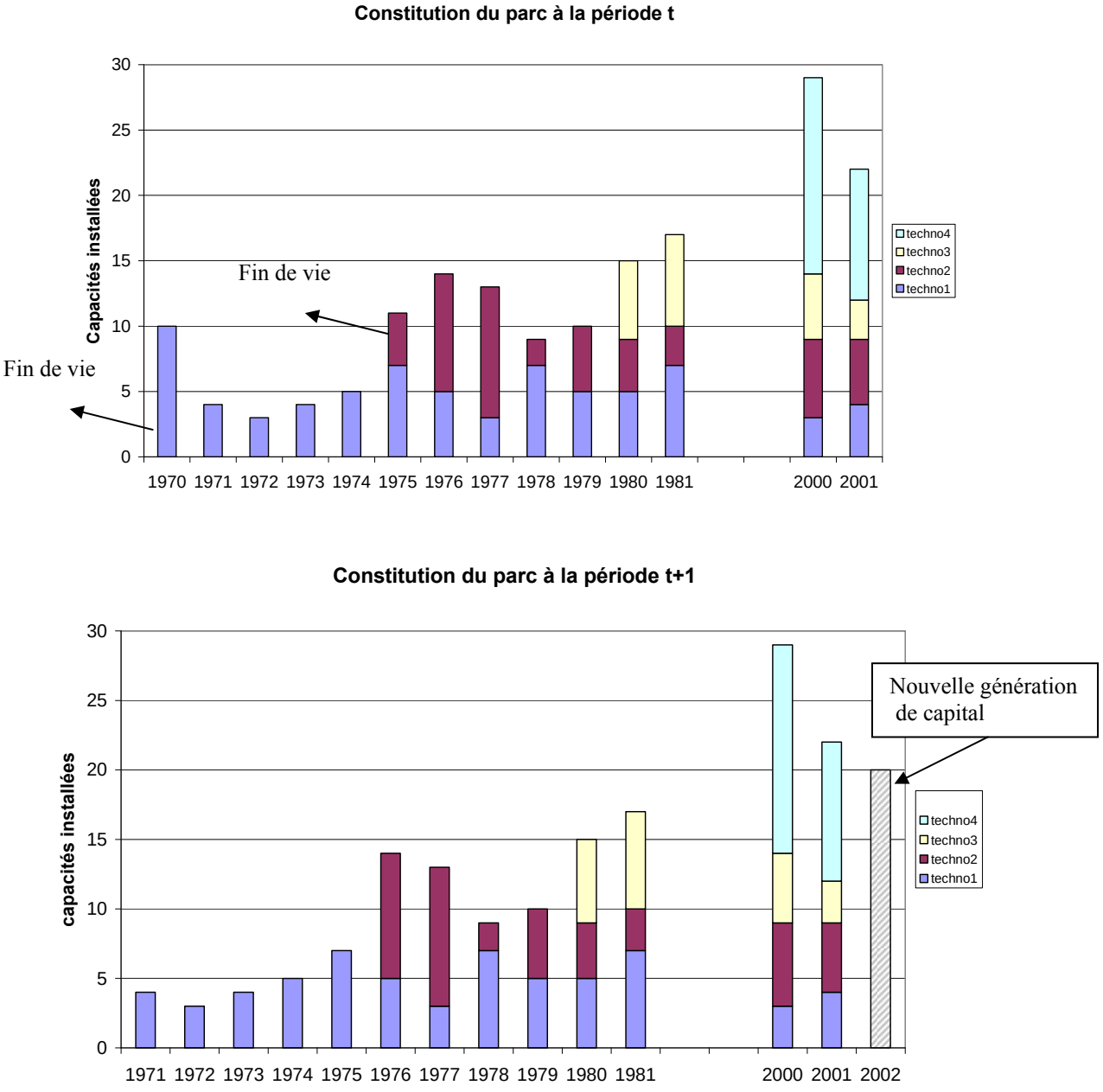


Figure 17 : Illustration de l'évolution des générations de capital pour un portfolio de technologies aux durées de vie variables

4.2 La contrainte physique et temporelle de la courbe de charge

Face à une demande d'électricité fluctuante à l'échelle journalière et saisonnière, la courbe de charge du système de production fournit la puissance appelée en fonction du temps (Figure 18). Pour la programmation des investissements, il est d'usage d'agréger les courbes de charges

correspondant aux 365 jours de l'année dans une unique courbe, appelée *monotone de puissance*, construite en classant les tranches horaires en fonction de la puissance appelée au lieu de l'ordre chronologique. La monotone de puissance annuelle représente ainsi les variations de puissance appelée et les moyens de production qu'il faut mettre en opération pour différentes durées. Comme le montre la Figure 19, la monotone se présente sous la forme d'une courbe décroissante, fonction de la durée d'appel, mesurée en heure, qui varie de zéro à 8760 heures, soit une année complète. La puissance maximale appelée sur le réseau est donnée par le maximum de la courbe, à son intersection avec l'axe des ordonnées ; la puissance appelée minimale à fournir toute l'année est la valeur de cette fonction pour 8760 heures.

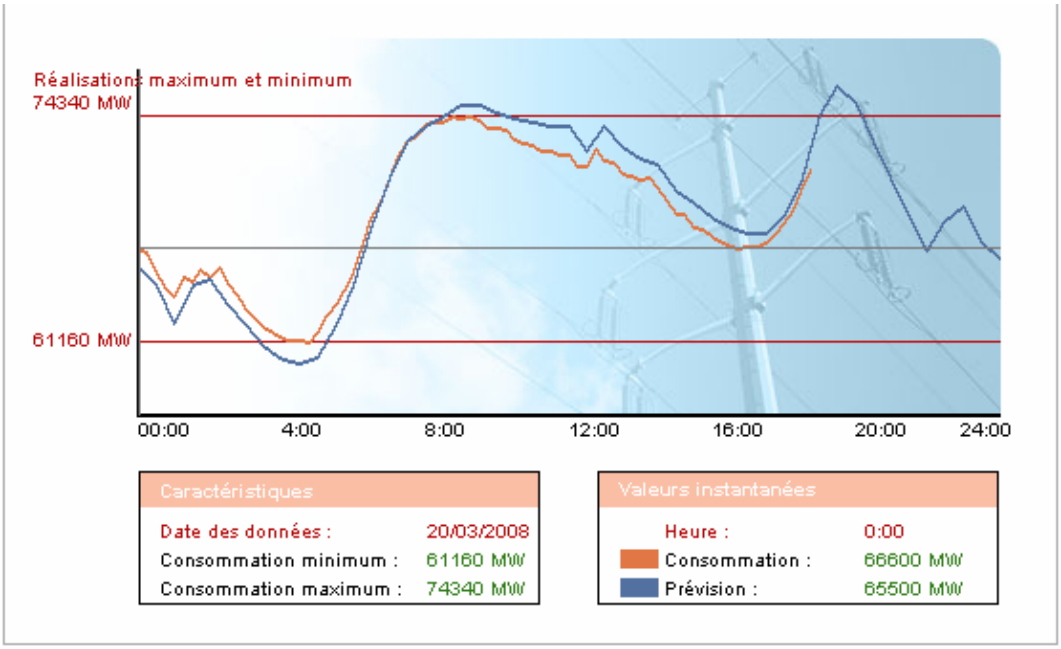


Figure 18 : Courbe de charge du 20 mars 2008, réseau électrique français (Source, Réseau de Transport d'Electricité)

La forme de la monotone de puissance est propre à chaque région car elle est directement liée à la variabilité temporelle de la demande d'électricité. Cette variabilité dépend des variations climatiques saisonnières de la région considérée mais aussi de la composition de la demande d'électricité, la demande des ménages étant beaucoup plus variable dans le temps que celle émanant du secteur industriel par exemple. Dans un souci de simplification numérique, les monotones de puissances régionales ont été schématisées par des fonctions linéaires par morceaux (Figure 19) selon les spécifications suivantes :

- Les durées annuelles d'appel possibles (mesurées en heure) sont discrétisées en 7 intervalles entre les bornes suivantes : {0, 730, 2190, 3650, 5110, 6570, 8030, 8760} ;
- Le maximum de puissance appelé l'est pour une durée de 730 heures (puissance de pointe) ;
- Le minimum de puissance appelé l'est pour une durée de 8760 heures (puissance de base) ;
- Le niveau de puissance appelé pour les autres durées est calculé en partageant l'intervalle entre puissance de base et puissance de pointe en six tranches de tailles égales.

Avec ces hypothèses simplificatrices, la monotone de puissance de chaque région peut ainsi être caractérisée complètement par deux paramètres : la puissance de pointe et la puissance de base.

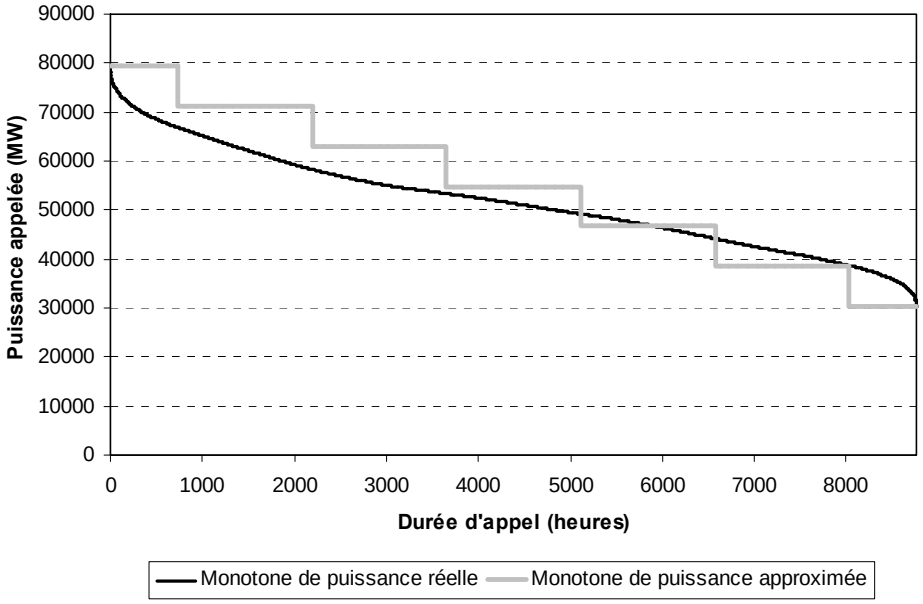


Figure 19 : Exemple de monotone de puissance et méthode d'approximation

La monotone de puissance fait aussi le lien entre la puissance installée dans les capacités de production (exprimée en mégawatt) et la quantité d'énergie annuellement produite (mesurée en mégawatt-heure ou toute autre unité d'énergie) en utilisant de manière flexible et partielle les capacités existantes selon la demande adressée au réseau. L'électricité annuellement produite s'obtient simplement en calculant l'intégrale de la monotone de puissance sur l'intervalle [0 ; 8760], équivalente à l'aire sous la courbe présentée sur la Figure 19.

Le passage des puissances installées à l'énergie produite est réalisé à chaque étape de la simulation pour recalculer les coefficients techniques du secteur électrique, qui dépendent des choix de mise en production des puissances installées en fonction des coûts variables de chaque capacité installée. Le passage inverse, de l'énergie aux capacités, est nécessaire lors de la programmation des investissements, puisqu'il faut alors connaître, à partir d'une demande d'énergie annuelle anticipée, la monotone de puissance qui correspond.

Pour calibrer et reconstituer la monotone de puissance à chaque date, nous supposons en plus que le ratio de la puissance de pointe et la puissance de base, noté bp_ratio_k, reste constant et égal à une valeur fournie par le modèle POLES[23]. En utilisant notre méthode d'approximation linéaire par morceaux des monotones de puissance, le calcul de la monotone de puissance associée à une quantité Q_elec_k d'électricité produite dans la région k s'obtient en résolvant le système (3.13) qui rassemble l'équation de constance du ratio et l'équation de contrainte sur la quantité d'énergie produite :

[23] Ce ratio pourrait varier de façon exogène ou endogène, pour intégrer par exemple sa modification sous l'effet de politiques de maîtrise ou de décarbonisation de la demande comme le développement du chauffage électrique, mais nous le garderons constant dans les exercices présentés dans cette thèse.

$$\begin{cases} \dfrac{base_MW_k}{peak_MW_k} = bp_ratio_k \\ base_MW_k \times 8760 + \dfrac{peak_MW_k - base_MW_k}{6} \times \left(8030 + 6570 + 5110 + 3650 + 2190\right) + peak_MW_k \cdot 730 = Q_elec_k \end{cases} \quad (3.13)$$

où $base_MW_k$ et $peak_MW_k$ sont respectivement les puissances appelées en période de base et en période de pointe.

4.3 Planification optimale des investissements en anticipation imparfaite

Nous disposons, avec la représentation compacte des technologies et de la courbe de charge que nous venons de présenter, des objets techniques nécessaires et suffisants pour modéliser les choix d'investissement dans le secteur électrique à chaque date *t*, choix qui vont progressivement modifier le volume et la composition technologique du parc installé. Il s'agit en fait de représenter une démarche de planification optimale avec des anticipations imparfaites, démarche qui conduit à déterminer le contenu technologique et le volume des investissements à l'année en cours qui permettent de répondre à une potentielle demande future d'électricité en minimisant le coût complet moyen de production.

La procédure de décision est décomposée en 5 étapes successives :

- La projection de la demande future et des prix futurs des combustibles ;
- Le choix des capacités de production d'électricité d'origine éolienne ;
- Le choix des capacités de production hydroélectriques ;
- La projection du parc conventionnel optimal pour répondre à la demande résiduelle ;
- La décision d'incrément annuel des investissements pour faire évoluer le parc existant vers le parc idéal qui vient juste d'être calculé.

Le traitement séparé des énergies éoliennes et hydroélectriques est justifié par les spécificités de ces énergies, notamment leurs potentiels limités. Nous donnons une explication plus détaillée de ces spécificités dans les paragraphes dédiés.

4.3.1 Projection de la demande et anticipation du prix des combustibles

La planification du parc idéal et des investissements annuels à chaque période s'effectue en fonction d'anticipations adaptatives de la croissance de la demande d'électricité sur les dix années suivantes et des prix futurs des combustibles fossiles.

Comme le montre l'équation (3.14), les projections régionales de production d'électricité pour la période *t+10*, notées $Q_elec_anticip_k$, sont calculées à partir du taux de croissance courant de la production d'électricité, $tendance_Q_elec_k$,qui est supposé stable pour les dix années suivantes, et de la production courante d'électricité $Q_{k,elec}$ (en mégawatt-heure).

$$Q_elec_anticip_k = Q_{k,elec}.(1+tendance_Q_elec_k)^{10} \quad (3.14)$$

La production anticipée d'électricité du parc conventionnel est associée à une monotone de puissance anticipée qui est déterminée grâce à la résolution du système (3.13). Le parc de production disponible à la période *t+10* devra ainsi fournir une puissance de base notée $base_MW_anticip_k$, une puissance de pointe notée $peak_MW_anticip_k$, et les puissances notées $Cap_MW_anticip_duree_i_k$, définies par l'équation (3.15), seront appelées pour les durées intermédiaires comprises dans l'ensemble discret {8030 , 6570 , 5110 , 3650 , 2190 , 730} :

$$Cap_MW_anticip_duree_i_k = \frac{peak_MW_anticip_k - base_MW_anticip_k}{6} \quad (3.15)$$

Pour $i \in \{8030,6570,5110,3650,2190,730\}$.

En ce qui concerne les prix des combustibles, nous nous cantonnons à une hypothèse d'anticipation « myope », selon laquelle les prix courants sont pris comme prix futurs anticipés, sans tenir compte des évolutions récentes. Cela revient à supposer que face à l'incertitude des fluctuations de court-terme des prix des ressources fossiles, les producteurs d'électricité prennent les prix courants comme la meilleure information disponible. Dans des versions futures du modèle, nous pourrons bien entendu introduire des modes d'anticipation plus sophistiqués, et notamment la possibilité de représenter une fourchette d'anticipations de prix et une approche d'optimisation sous incertitude. En revanche, en complément de cette anticipation très limitée des prix futurs des énergies fossiles, les agents sont supposés être parfaitement informés du profil de taxe carbone fixé par le régulateur dans les scénarios de stabilisation. Autrement dit, nous supposons que le régulateur est d'une part assez clairvoyant, ou engagé sur le long terme, pour fixer à l'avance une trajectoire de réduction ou de prix du carbone sur plusieurs décennies, et d'autre part assez crédible dans ses actions pour que ses objectifs soient jugés crédibles par les agents économiques. Avec cette hypothèse, les valeurs anticipées des prix taxés des trois combustibles fossiles – charbon, pétrole et gaz – seront respectivement notées $p_coal_anticip_taxed_k$, $p_oil_anticip_taxed_k$, et $p_gas_anticip_taxed_k$. Pour les technologies de production électrique qui utilisent le captage et stockage du CO_2, un coefficient d'atténuation spécifique s'applique à la taxe pour ne compter que les émissions nettes de CO_2.

4.3.2 Détermination, en amont, des investissements dans les capacités de production renouvelables non hydrauliques

L'intégration de capacités de production fondées sur les énergies renouvelables non hydrauliques bénéficie dans la version actuelle du modèle d'un traitement particulier, lié (i) au caractère intermittent de la production associée, qui ne peut donc dépasser une certaine part de la production totale, (ii) au surcoût actuel de la plupart de ces technologies par rapport au thermique charbon ou au nucléaire standardisé par exemple, qui nécessite une intervention publique pour forcer la pénétration de ces technologies *via* des subventions (tarifs d'achat par exemple) ou des quotas (certificats verts par exemple), (iii) aux possibilités d'auto-production d'électricité d'origine

renouvelable dans le bâtiment par exemple[24], qui viennent retrancher la demande ainsi satisfaite de la demande totale adressée au réseau. Dans l'état d'avancement du modèle, ces multiples spécificités sont prises en compte de manière agrégée sous la forme de deux hypothèses :

- La seule énergie renouvelable représentée explicitement dans les choix d'investissements du parc d'offre est l'énergie éolienne, soit terrestre soit offshore. L'énergie solaire est supposée n'être utilisée que sous une forme intégrée aux bâtiments, permettant à ceux-ci de satisfaire une partie des besoins résidentiels par auto-production et de descendre en dessous du seuil de consommation d'énergie commerciale de 50 kWh/m^2/an (catégorie « très basse énergie »).

- La planification des nouvelles capacités éoliennes s'effectue en amont de la planification des constructions de capacités utilisant des technologies conventionnelles et sans tenir compte de la monotone de puissance anticipée.

En fait, le dimensionnement du parc se fait à travers le choix de la part de la production éolienne dans la production totale d'énergie, $share_ENR_elec_k$, part qui est supposée dépendre du ratio entre le coût complet de production par kWh[25] d'électricité éolienne et le coût complet anticipé minimal de production d'électricité en période de base avec les technologies conventionnelles. La valeur de cette part est limitée régionalement pour prendre en compte (i) les limites physiques à la pénétration de l'électricité d'origine renouvelable à génération intermittente sur le réseau de distribution[26] et (ii) les contraintes liées à la saturation des potentiels de production renouvelable régionaux. Dans tous les cas, la valeur de cette part ne peut pas excéder 40%. La quantité d'énergie éolienne souhaitée à t+10 est alors donnée par l'équation :

$$Q_elec_ENR_anticip_k = Q_elec_anticip_k \cdot share_ENR_elec_k \qquad (3.16)$$

La planification progressive des investissements pour garantir les capacités de production nécessaires à la fourniture de cette énergie d'origine éolienne – notées $Cap_elec_MW_anticip_{k,TECH_ENR}$ – nécessite encore un arbitrage entre éolien terrestre et l'éolien offshore, lequel arbitrage dépend de la rentabilité relative des deux catégories de technologies. Enfin, pour obtenir la capacité de puissance à installer en fonction de l'énergie devant être fournie dans ces deux catégories, il faut prendre en compte la durée moyenne d'utilisation annuelle correspondant à chaque technologie.

[24] Nous avons aussi évoqué, lors de discussions à propos des scénarios Facteur 4 avec les industriels, les possibilités de production décentralisée pour l'industrie, comme l'alimentation des cimenteries par éoliennes.
[25] Se reporter à l'équation (3.23) pour le mode de calcul du coût complet de production
[26] Dans certains cas, une répartition étalée des éoliennes sur le territoire peut garantir une puissance donnée pendant la quasi-totalité de l'année.

4.3.3 Investissement prioritaire dans l'hydroélectrique

La quantité d'énergie restant à fournir, en plus des capacités éoliennes qui ont été déterminées, est notée $Q_elec_CONV_anticip_k$ et est simplement obtenue en retranchant de la demande totale anticipée l'énergie qui doit être fournie par le parc éolien en construction. La détermination de la composition du parc de production conventionnel qui permettra de fournir cette quantité d'énergie fait appel prioritairement aux capacités d'hydroélectricité disponibles puis au reste des énergies conventionnelles.

L'hydroélectricité est traitée de manière spécifique parce que l'investissement dans cette technologie est à la fois dépendant de sa rentabilité relative et des sites géographiques disponibles. Nous n'effectuons pas dans ce module de différenciation entre les centrales « fil de l'eau » ou avec retenue, si bien que les capacités de production hydroélectrique sont sollicitées en priorité par rapport à toutes les autres technologies conventionnelles, pour répondre aux appels de puissance correspondant à la production de base ou aux tranches supérieures.

Dans chaque région du modèle, des données calibrées sur le modèle MARKAL monde (Labriet et *al.*, 2004) fournissent le volume potentiel de production hydroélectrique techniquement exploitable (exprimé en gigawatts). De la même façon que pour l'énergie éolienne, le secteur électrique choisit la part de ce potentiel qu'il anticipe d'exploiter à la période *t+10* en comparant le coût complet de production par kWh hydraulique associé à ces nouvelles capacités avec le coût complet anticipé minimal de production d'électricité en période de base sur l'ensemble des autres technologies conventionnelles. En appliquant cette part au potentiel régional de production d'hydroélectricité, il anticipe alors de disposer d'une capacité de production hydroélectrique $Cap_elec_MW_anticip_{k,Hydro}$, qu'il utilisera prioritairement pour les plus longues durées d'appel (base et tranches juste supérieures).

De ce fait, pour déterminer les capacités de production conventionnelles qu'il reste à anticiper pour satisfaire à la contrainte de la monotone de puissance anticipée, le calcul d'optimisation du parc conventionnel hors hydroélectrique sera effectué sur une monotone de puissance tronquée par le bas d'une puissance égale aux capacités de production hydroélectriques anticipées. Techniquement, le secteur électrique va ensuite effectuer un calcul d'optimisation sur la base d'une monotone de puissance modifiée, en soustrayant aux capacités totales demandées dans les tranches les plus basses la puissance assurée, dans ces tranches, par des capacités hydroélectriques (cf. Figure 20).

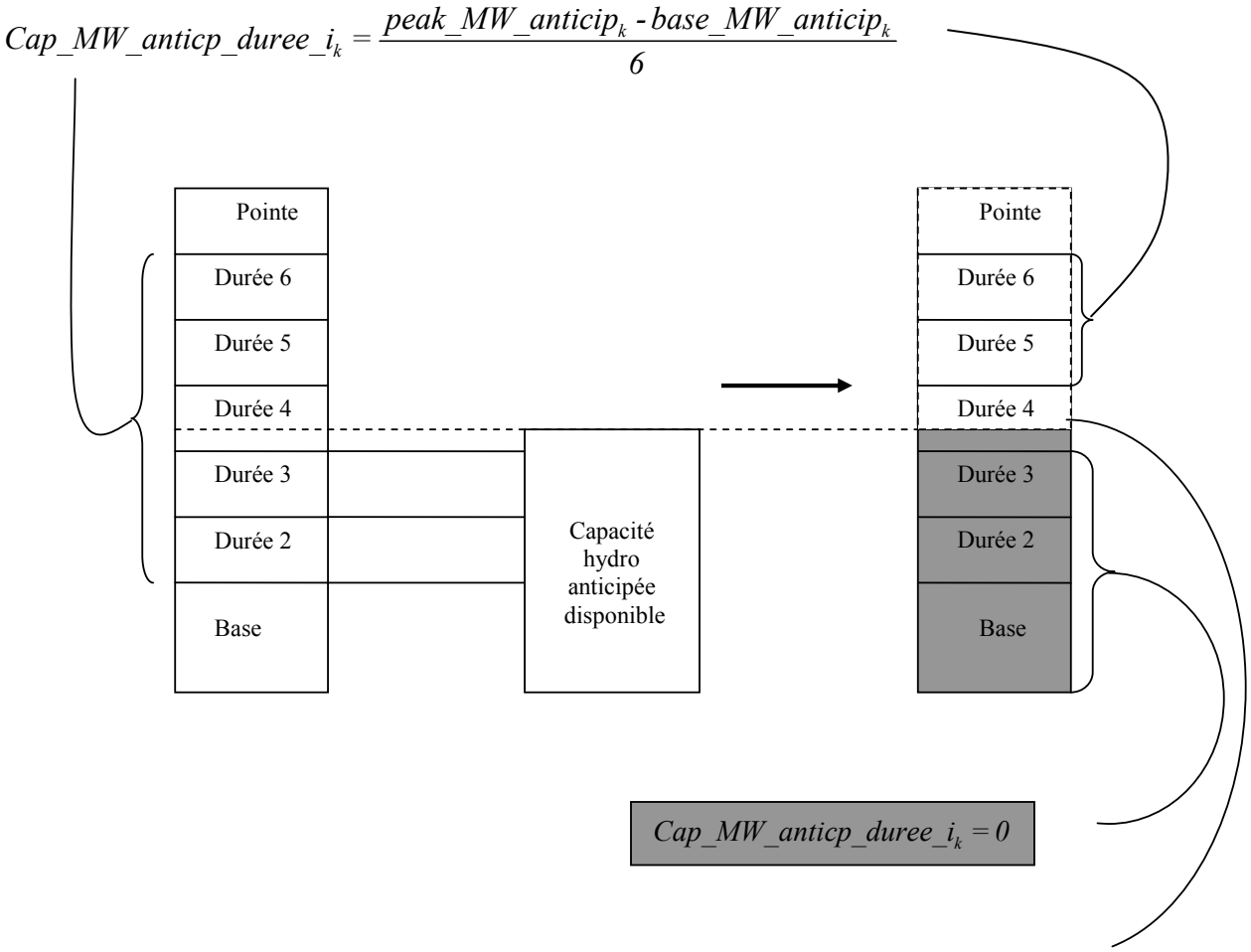


Figure 20 : Exemple de répartition des capacités hydroélectriques anticipées pour répondre aux capacités appelées dans la monotone de puissance

4.3.4 Parc de production conventionnel

La monotone de puissance « résiduelle » – une fois retranchées les capacités éoliennes et hydroélectriques – fournit, pour chacune des 7 tranches de durée d'utilisation annuelle, un volume de capacités de production conventionnelles qui devra être disponible à la date *t+10*. Dans le parc de production anticipé à coût minimal, certaines capacités seront construites pour être utilisées en période de base (c'est-à-dire 8760 heures par an), d'autres pour être utilisées 8030 heures et ainsi de suite jusqu'à des capacités dites de pointes qui ne seront utilisées que 730 heures par an.

La planification du parc de production conventionnel à coût minimal pour la période *t+10* revient à déterminer, pour chaque durée d'utilisation annuelle discrétisée, la technologie de production qui est la moins coûteuse. L'évaluation de la compétitivité d'une technologie pour répondre à une durée d'utilisation annuelle fixée s'effectue grâce au calcul du coût complet actualisé de production du kilowattheure sur cette durée. Ce coût complet correspond au coût total actualisé sur la durée de vie de l'équipement d'un kilowatt de capacité installé qui rassemble :

- Le **coût en capital** ou coût de construction (3.17) ;
- les **coûts totaux actualisés d'exploitation et de maintenance fixes** par kW installé (3.18) ;
- les **coûts totaux actualisés d'exploitation et de maintenance variables** par kWh produit (3.19) ;
- les **coûts totaux actualisés de combustibles**, calculés en utilisant des scénarios de prix finaux des énergies fossiles anticipés (*cf.* section 4.3.1) (3.20).

Le coût total actualisé sur la durée de vie de l'équipement et dans chaque tranche de durée d'appel sert de base pour le calcul de l'annuité fixe équivalente au paiement de ce coût total actualisé. Le coût complet actualisé de production du kilowatt.heure pour cette durée d'utilisation est enfin obtenu en ramenant cette annuité au kilowatt.heure produit (Equ.(3.22) et (3.23)).

$$TC_INV_elec_duree_i_{k,TECH} = CINV_kW_{k,TECH} \tag{3.17}$$

$$TC_OM_fixed_elec_durée_i_{k,TECH} = \sum_{i=1}^{life_time_{k,TECH}} \left(\frac{OM_cost_fixed_{k,TECH}}{\left(1+disc_{k,TECH}\right)^{i}} \right) \tag{3.18}$$

$$TC_OM_var_elec_durée_i_{k,TECH} = \sum_{i=1}^{life_time_{k,TECH}} \left(\frac{\left(Capacity_factor_{k,TECH} \cdot durée_i\right)}{\left(1+disc_{k,TECH}\right)^{i}} \cdot OM_cost_var_{k,TECH} \right) \tag{3.19}$$

$$TC_fuel_elec_durée_i_{k,TECH} = \sum_{i=1}^{life_time_{k,TECH}} \left(\frac{Capacity_factor_{k,TECH} \cdot durée_i}{rho_elec_{k,TECH} \cdot \left(1+disc_{k,TECH}\right)^{i}} \cdot p_fuel_anticip_taxed_{k}(t+i) \right) \tag{3.20}$$

$$\begin{aligned} TC_elec_durée_i_{k,TECH} = {} & TC_INV_elec_duree_i_{k,TECH} + TC_OM_fixed_elec_duree_i_{k,TECH} \\ & + TC_OM_var_elec_duree_i_{k,TECH} + TC_fuel_elec_duree_i_{k,TECH} \end{aligned} \tag{3.21}$$

$$LC_elec_durée_i_{k,TECH} = \frac{CRF_{k,TECH}}{Capacity_factor_{k,TECH} \cdot durée_i} \cdot \left(TC_INV_elec_duree_i_{k,TECH} + TC_OM_fixed_elec_duree_i_{k,TECH} \right) + \frac{CRF_{k,TECH}}{Capacity_factor_{k,TECH} \cdot durée_i} \cdot \left(TC_OM_var_elec_duree_i_{k,TECH} + TC_fuel_elec_duree_i_{k,TECH} \right) \quad (3.22)$$

Ce qui donne finalement après substitution et simplification :

$$LC_elec_durée_i_{k,TECH} = \frac{CRF_{k,TECH}.CINV_kW_{k,TECH} + OM_fixed_elec_{k,TECH}}{Capacity_factor_{k,TECH}.durée_i} + CRF_{k,TECH} \cdot \sum_{i=1}^{life_time_{k,TECH}} \left(\frac{p_fuel_anticip_taxed_k(t+i)}{rho_elec_{k,TECH} \cdot \left(1 + disc_{k,TECH}\right)^i} \right) + OM_cost_var_{k,TECH} \quad (3.23)$$

Avec

$$CRF_{k,TECH} = \frac{disc_{k,TECH} \times (1 + disc_{k,TECH})^{life_time_{k,TECH}}}{\left((1 + disc_{k,TECH})^{life_time_{k,TECH}} - 1 \right)} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{life_time_{k,TECH}} \frac{1}{(1 + disc_{k,TECH})^i}} \quad (3.24)$$

Nous rappelons ici les notations et la définition des paramètres utilisés :

- *durée_i* est la durée d'utilisation annuelle telle qu'appelée par la monotone de puissance, $durée_i \in \{730, 2190, 3650, 5110, 6570, 8030, 8760\}$
- $Life_time_{k,TECH}$ est la durée de vie d'une capacité de production utilisant la technologie *TECH* dans la région *k*.
- $disc_{k,TECH}$ est le taux d'actualisation adopté par les agents du secteur électrique de la région *k*.
- $rho_elec_{k,TECH}$ est l'efficacité énergétique de la technologie *TECH* pour la région *k*. Ce paramètre est différent de l'unité uniquement pour les technologies de production utilisant des combustibles fossiles.
- $p_fuel_anticip_taxed_k(t+i)$ est le prix final anticipé du combustible pour l'année $t+i$ dans la région *k*, l'indice *fuel* peut correspondre, en fonction de la technologie considérée, au charbon, au gaz ou au fioul lourd.
- $Capacity_factor_{k,TECH}$ est le taux de disponibilité annuel d'un kilowatt installé pour la technologie *TECH* dans la région *k*.

Le calcul du coût complet actualisé de production du kWh pour chaque technologie conventionnelle permet de déterminer celles qui sont les plus rentables pour chacune des durées d'utilisation annuelle possibles. La pénétration de ces technologies sera alors favorisée dans le

nouveau parc, mais sans allocation totale des investissements à la technologie la plus rentable. En effet, les hétérogénéités de marché, les incertitudes liées aux calculs des coûts actualisés de production justifient la diversification du portefeuille des technologies et la coexistence, au sein d'un même parc, de technologies concurrentes (Clarke et Edmonds, 1993).

Techniquement, la répartition des différentes technologies parmi les capacités anticipées de production dédiées à une utilisation annuelle d'une durée fixée s'effectue selon une fonction *logit* (3.25). Pour chaque durée d'utilisation, cette fonction de part est calibrée à l'année de référence pour reproduire les comportements réels d'investissement de l'époque en fonction des coûts de production anticipés calculés dans le modèle. Ces coûts anticipés incorporent un coût supplémentaire appelé *coût intangible* et noté *ICo_elec_durée_i,* dont la valeur permet d'ajuster les parts de marché des différentes technologies à l'année de référence aux comportements réels d'investissement du secteur électrique dans les régions du modèle à cette date.

$$share^{durée_i}_{k,TECH}(t) = \frac{\left(ICo_elec_durée_i_{k,TECH}(t) + LC_elec_durée_i_{k,TECH}(t)\right)^{-\gamma_elec_k}}{\sum_{TECH_j}\left(ICo_elec_durée_i_{k,TECH_j}(t) + LC_elec_durée_i_{k,TECH_j}(t)\right)^{-\gamma_elec_k}} \quad (3.25)$$

où $\gamma_{k,durée_i}$ est un paramètre reflétant l'homogénéité du marché pour ce type de compétition technologique dans la région *k* et pour la durée d'utilisation *durée_i*.

Les capacités du parc conventionnel idéal à t+10, notées $Cap_MW_exp_{k,TECH}$, sont obtenues en sommant les capacités de production souhaitées dans les 7 tranches de durée d'appel :

$$Cap_MW_exp_{k,TECH} = \sum_{durée_i} \frac{share^{durée_i}_{TECH,k}.Cap_MW_anticip_duree_i_k}{Capacity_factor_{k,TECH}} \quad (3.26)$$

4.3.5 Composition de l'investissement courant : minimisation de la distance entre parc de production optimal anticipé et parc installé

La procédure décrite dans la sous-section précédente permet de définir à chaque date *t* le parc de production optimal anticipé pour la période *t+10*. Les décisions d'investissement à la date *t* visent ensuite à réorienter le parc de production existant vers le parc de production idéal anticipé à échéance d'une décennie, sous contrainte de disponibilité des capitaux.

Pour aboutir avec certitude au parc idéal anticipé à t+10, il suffirait de faire évoluer les capacités en 10 étapes égales. Par exemple, entre *t* et *t+1*, l'évolution des capacités serait donnée par l'équation (3.27). Mais cette évolution peut se heurter d'une part à des contraintes de financement et d'autre part à la nécessité de déprécier certaines capacités avant leur fin de vie.

$$delta_Cap_MW_G_{k,TECH} = \frac{Cap_MW_exp_{k,TECH} - Cap_MW_depreciated_{k,TECH}}{10} \quad (3.27)$$

Dans la version actuelle du modèle, ni la possibilité d'un retrait anticipé de certaines capacités de production ni la modification des technologies encapsulées dans les capacités en place ne sont envisagées : en quelque sorte, nous décrivons une borne haute de l'inertie des équipements et des technologies. Cette hypothèse nécessite de réécrire l'expression (3.27) sous la double contrainte de :

- ne pas disposer d'investissements négatifs pour certaines technologies ;
- ne pas obtenir une taille totale des nouveaux investissements (en mégawatt) qui conduise, en cas de réalisation, à un parc de production électrique pour la période suivante qui soit surdimensionné par rapport à la production d'électricité anticipée.

La composition de l'investissement effectivement réalisé, noté $Inv_MW_{k,TECH}$, s'obtient en résolvant un programme de minimisation de la distance entre investissement réalisé et investissement espéré net, sous contrainte de la quantité de capital effectivement allouée au secteur électrique $Inv_elec_val_k$:

$$\underset{Inv_MW_{k,TECH}}{Min} \sum_{TECH} \left(Inv_MW_{k,TECH} - delta_Cap_MW_G_{k,TECH} \right)^2 \quad (3.28)$$

$$s.c. \begin{cases} Inv_elec_val_k = \sum_{TECH} Inv_MW_{k,TECH}.CINV_MW_{k,TECH} \\ Inv_MW_{k,TECH} \geq 0 \end{cases}$$

Cet investissement génère une nouvelle génération de capital, qui modifie à la marge la composition du parc de production électrique pour l'équilibre statique suivant :

$$Cap_MW^{vintage}_{k,TECH}(t + lifetime_{k,TECH}) = Inv_MW_{TECH,k} \quad (3.29)$$

A partir de ce nouveau parc installé, il reste à calculer les nouveaux coefficients techniques caractérisant les technologies encapsulées dans les capacités du secteur électrique, pour la résolution de l'équilibre statique suivant.

4.4 Du parc de production installé au coût moyen de production

Une fois les investissements réalisés selon les anticipations imparfaites des prix et de la demande future, la répartition de la production effective selon les capacités de production existantes dépend de la courbe de charge réelle. Pour être complètement cohérent, il faudrait intégrer les choix d'opération des différentes capacités dans l'équilibre statique, puisqu'il ne s'agit plus de choix de long terme mais d'arbitrages de court terme, dépendant des conditions instantanées des marchés des énergies. Néanmoins nous avons jugé que l'intégration de cet arbitrage dans l'équilibre statique était trop complexe et nous l'avons « délocalisé » dans le module dynamique précédent. Ce faisant,

nous effectuons une approximation en calculant les coefficients techniques du secteur électrique à partir des anticipations à *t+1* des prix des fossiles et de la demande totale, au lieu de les calculer à partir des variables effectives. Nous supposons que cette approximation est de second ordre.

Dans chaque région du modèle, les producteurs d'électricité effectuent une anticipation sur la production d'électricité à fournir pour la période suivante, notée $Q_elec_anticip_t+1_k$.

Cette production est assurée en partie par les capacités de production à base d'énergie éolienne, sollicitée à hauteur de leur durée d'utilisation moyenne, comme cela a été prévu dans la planification de ces capacités (voir sous section 4.3.2). L'énergie ainsi produite est déduite de la demande totale anticipée.

Le secteur électrique anticipe ensuite que la demande résiduelle est répartie selon une monotone de puissance anticipée, calculée en suivant le même processus que précédemment (voir sous section 4.2) mais à t+1 au lieu de t+10. Le secteur électrique cherche ensuite à minimiser les coûts variables de production pour répondre à la demande hors la part déjà satisfaite avec de l'électricité d'origine éolienne, compte tenu de la monotone de puissance anticipée. La variable de commande est la durée d'utilisation anticipée pour chaque unité de capacité de production installée. En fonction des prix courants des énergies fossiles, calculés dans l'équilibre statique précédent, les technologies de production conventionnelles sont classées par coût variable de production croissant. La monotone de puissance anticipée détermine sept tranches de puissances associées aux sept durées d'appel discrétisées. Les capacités de production disponibles sont utilisées par coût variable croissant pour fournir la puissance demandée par tranche de durée d'appel décroissante. Cela signifie en pratique que la technologie au coût variable de production le plus faible sera utilisée pour la durée d'appel la plus longue (la base) jusqu'à ce que :

- Soit la puissance appelée dépasse la capacité de production disponible pour cette technologie et l'on fera appel aux capacités de production installées de la technologie ayant un coût variable de production immédiatement supérieur pour obtenir la puissance supplémentaire.
- Soit les capacités de production disponibles pour cette technologie dépassent la puissance appelée pour cette durée d'appel et les capacités de production disponibles restantes seront utilisées pour répondre à la demande associée à la durée d'appel immédiatement inférieure.

La Figure 21 fournit un exemple d'empilement des technologies par ordre de mérite en fonction de leur durée d'utilisation.

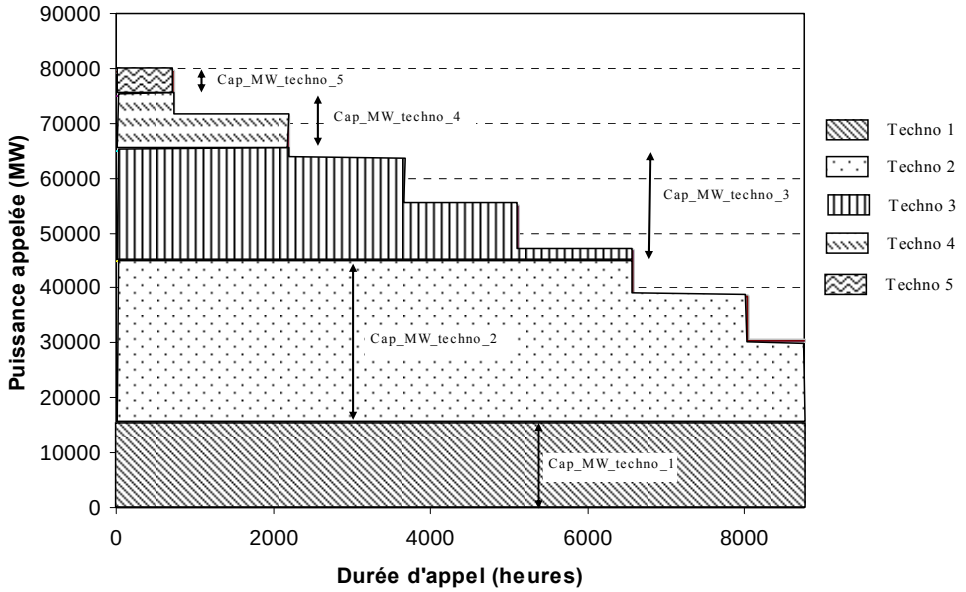


Figure 21 : Exemple de calcul des durées d'utilisation annuelles pour cinq technologies différentes classées par coût de production variable croissant (la technologie n°1 a le coût de production variable le plus faible et la technologie n°5, le plus élevé) et dont les capacités de production disponibles sont notées Cap_MW_techno_i, pour i appartenant à l'ensemble discret {1 ;2 ;3 ;4 ;5}.

Ce programme de minimisation des coûts de production permet d'associer, dans chaque région *k*, à chaque stock de capacités de production installées utilisant la technologie *TECH* (noté $Cap_elec_MW_{k,TECH}$ et mesuré en mégawatt), une durée moyenne d'utilisation annuelle (mesurée en heures). Le produit de ces deux termes permet de déterminer la quantité d'électricité, notée $prod_elec_techno_{k,TECH}$ (en MWh), effectivement produite à partir de la technologie considérée.

Pour les technologies conventionnelles utilisant des combustibles fossiles, la consommation de combustible associée à la production d'électricité avec cette technologie se calcule directement à partir de l'efficacité énergétique moyennée sur les générations de capital installées de cette technologie suivant l'équation (3.30).

$$input_ENER_elec_{k,TECH} = \frac{prod_elec_techno_{k,TECH}}{rho_elec_{k,TECH}} \tag{3.30}$$

Les coefficient techniques unitaires de production qui caractériseront le secteur électrique dans l'équilibre statique suivant (quantités des différents combustibles nécessaires pour produire une unité d'électricité) sont finalement déterminés pour le charbon, le gaz et les carburants liquides par les équations (3.31), (3.32) et (3.33).

$$IC_{coal,elec,k} = \frac{\sum_{TECH_COAL} \frac{prod_elec_techno_{k,TECH_COAL}}{rhoelec_{k,TECH_COAL}}}{Q_elec_anticip_t + l_k} \tag{3.31}$$

$$IC_{gas,elec,k} = \frac{\sum_{TECH_GAS} \frac{prod_elec_techno_{k,TECH_GAS}}{rhoelec_{k,TECH_GAS}}}{Q_elec_anticip_t + l_k} \quad (3.32)$$

$$IC_{Et,elec,k} = \frac{\sum_{TECH_ET} \frac{prod_elec_techno_{k,TECH_ET}}{rhoelec_{k,TECH_ET}}}{Q_elec_anticip_t + l_k} \quad (3.33)$$

5 Demandes d'énergie finale

Dans le modèle, la demande agrégée d'énergie finale adressée aux secteurs de production d'énergie est décomposée en trois grands postes de demande : les secteurs productifs (agriculture, industrie, construction, services), le secteur résidentiel et les transports.

5.1 Consommations intermédiaires d'énergie des secteurs productifs

Dans la version actuelle du modèle, les secteurs productifs *agriculture, industrie, construction* et *composite*, dont la composition a été présentée au chapitre précédent (*cf.* section 2), couvrent toute l'activité économique hors énergie et transports.

Comme chacun de ces « méta-secteurs » recouvre des secteurs économiques et des produits très variés, les capacités de production et la production elle-même ne peuvent être mesurées qu'en indices de « quasi-quantités ». Le niveau d'agrégation ne permet plus d'adosser la représentation de ces structures de coûts agrégées à un simple choix parmi un portfolio discret de technologies, contrairement au secteur électrique présenté ci-dessus. Par contre, l'inertie du capital et des technologies installés reste explicite grâce à une représentation en générations de capital (*cf.* chapitre 3, section 4.1.3).

La représentation des techniques dans chacun de ces « méta-secteurs » est une moyenne des consommations de facteurs par tous les sous-secteurs couverts. Par conséquent, l'évolution de ces consommations moyennes dépend non seulement des changements et progrès techniques dans tous les sous-secteurs inclus dans chaque « méta-secteur », mais aussi des effets de structure liés aux variations de croissance relatives des sous-secteurs. Ce niveau d'agrégation élevé implique de prendre en compte trois mécanismes différents, qui concernent tout ou partie des capacités installées et qui se combinent comme indiqué sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**:

- Dans tous les « méta-secteurs », **des gains d'efficacité « au fil de l'eau »** (❸) qui bénéficient tant aux capacités construites dans les périodes précédentes qu'aux nouvelles capacités,
- Dans le secteur industrie seulement, **une tendance à la baisse structurelle de l'intensité énergétique** (❹) liée à une diminution de la part des industries lourdes par rapport à celles des industries manufacturées ;

- Dans toutes les nouvelles tranches de capacité, le **choix des nouvelles techniques**, qui recouvrent à la fois une meilleure efficacité énergétique (❺) et des changements de panier énergétique (❼). L'intensité énergétique de la nouvelle génération de capacité est la somme d'un terme des progrès au fil de l'eau (❷) et d'un terme de progrès technique induit par la hausse de la taxe carbone.

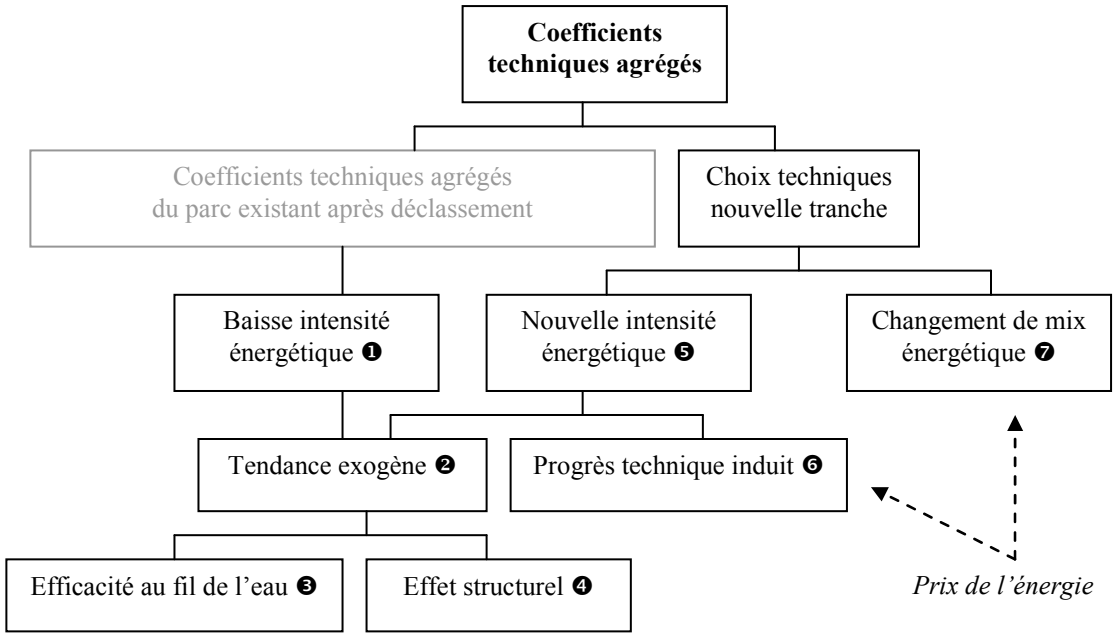


Figure 22 : Schéma de décomposition des changements de consommations intermédiaires d'énergie

La tendance exogène (❷) a un statut similaire au paramètre d'amélioration autonome de l'efficacité énergétique (AAEE, ou AEEI) utilisé traditionnellement dans tous les modèles (Azar et Dowlatabadi, 1999), mais elle est décomposée en un effet d'efficacité pure et un effet de structure. Les taux annuels de réduction varient dans le temps et entre les régions du modèle, selon des valeurs calibrées à partir des taux historiques d'amélioration de l'efficacité énergétique dans les secteurs concernés. A titre d'exemple, la Figure 23 reproduit les gains cumulés d'efficacité énergétique prescrits pour trois zones géographiques. Les gains annuels sont supposés décroissants pour toutes les régions et supérieurs dans les PED et les économies en transitions par rapport aux régions de l'OCDE, sous l'effet conjoint de la réduction progressive de la part des activités du secteur informel dans les économies en développement et de transferts de technologies efficaces vers les PED. En particulier, les phases de croissance rapide dans les pays émergents impliquent une construction intensive de nouveau capital, qui peut bénéficier des derniers progrès techniques développés au niveau mondial (*leap-frogging* ou « effet tunnel »).

L'effet de structure recouvre à la fois les modifications de la structure de la demande finale – ménages, administrations et investissements – adressée aux secteurs productifs et leurs gains de productivité respectifs. A cause du haut niveau d'agrégation dans le modèle, cet effet de structure est encapsulé dans un indicateur agrégé de diminution tendancielle de l'intensité énergétique, *EEI_struct(t)*.

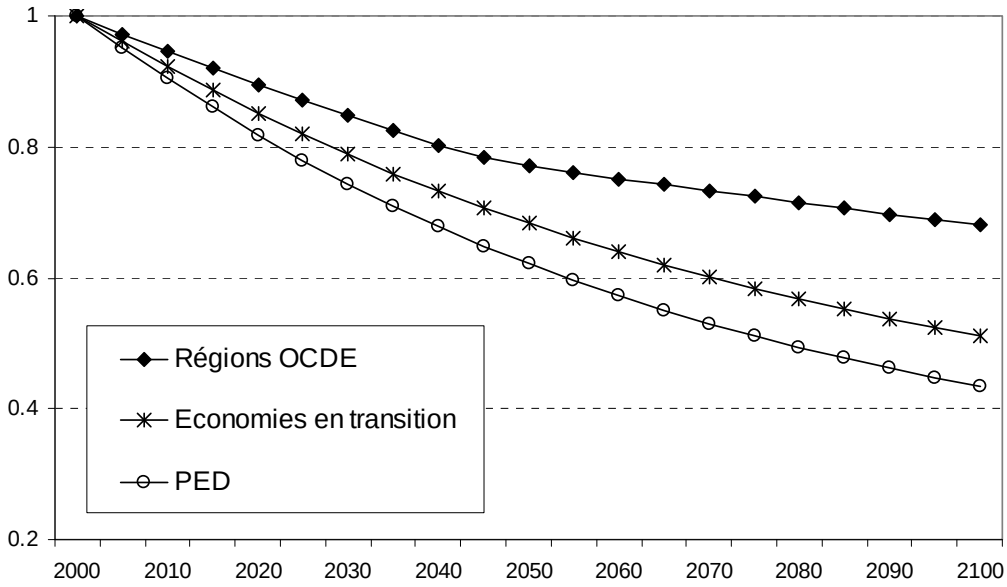


Figure 23 : Réduction de l'intensité énergétique sectorielle modélisée par l'AAEE

Les choix technologiques incorporés dans la nouvelle génération de capital bénéficient de la baisse tendancielle de l'intensité énergétique des secteurs, mais ils peuvent en plus faire l'objet (i) de gains supplémentaires induits par la taxe carbone, (ii) d'une substitution de sources d'énergie. Les gains supplémentaires sont représentés à travers une fonction de réponse au signal-prix du carbone $EEI(tax_CO2_{k,i})$. La Figure 24 fournit le profil de cette fonction réponse : aucun gain additionnel en dessous de 25 $ par tonne de CO_2, croissance linéaire jusqu'à 2% par an pour un signal prix de 150$ par tonne de CO_2 et plafonnement à 2% par an au-delà.

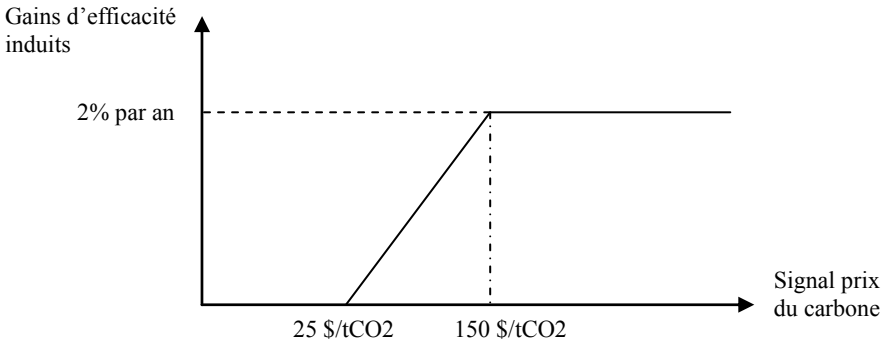


Figure 24 : Gains d'efficacité induits par la taxe carbone

Les substitutions de sources énergétiques répondent aux variations des prix des énergies, compte tenu des autres coûts liés au recours à chaque énergie. Les formes réduites représentant cette réponse sont d'une forme semblable aux fonctions compactes utilisées pour modéliser les choix technologiques des agents parmi des technologies identifiées pour produire un service énergétique donné. La part de chaque énergie dans les besoins d'énergie utile des nouvelles capacités de chaque « méta-secteur » est donnée par l'équation (3.34) ; elle dépend des prix finaux des énergies pour le secteur i, notés $pIC_{ENER,i,k}$, et du jeu de paramètres $K_sect_{ENER,i,k}$ et $\gamma_sect_{k,i}$ qui sont calibrés à l'année

de référence et encapsulent respectivement les autres coûts (capital, O&M, etc.) liés aux différentes énergies et le degré de substituabilité des sources d'énergie.

$$share_{ENER,i,k}(t) = \frac{\left(K_sect_{ENER,i,k} + pIC_{ENER,i,k}\right)^{-\gamma_sect_{k,i}}}{\sum_{ENER_j}\left(K_sect_{ENER_j,i,k} + pIC_{ENER_j,i,k}\right)^{-\gamma_sect_{k,i}}} \quad (3.34)$$

La modification des coefficients techniques des « méta-secteurs » intègre l'ensemble des effets décrits dans la Figure 22. Les consommations intermédiaires unitaires d'énergie **pour la nouvelle génération de capital**, construite à la période *t*, sont données par l'équation (3.35) :

$$IC^{vintage}_{ENER,j,k}(t + life_time_{k,j}) = \left(1 + AEEI_k(t) + EEI_k(t) + EEI_struct_k(t)\right) \cdot \frac{share_{ENER,i,k}(t)}{share_{ENER,i,k}(t\text{-}1)} \cdot IC^{vintage}_{ENER,i,k}(t\text{-}1 + life_time_{k,i}) \quad (3.35)$$

Les consommations intermédiaires unitaires d'énergie liées aux anciennes tranches de capital sont modifiées seulement selon les coefficients *AEEI* et *EEI_struct*. Enfin, les consommations intermédiaires agrégées de chaque secteur sont obtenues en faisant la moyenne des consommations de toutes les générations de capacités en opération.

5.2 Usages résidentiels

Dans la structure de modélisation IMACLIM-R, la consommation d'énergie du secteur résidentiel est *fixée* dans chaque équilibre statique, *via* les paramètres α^{m2} (*cf.* chapitre 3, section 3.1.2). Elle joue donc le rôle d'une contrainte physique sur le budget des ménages, parce qu'elle est directement liée au stock physique de bâtiment disponible à la période courante et à des coefficients unitaires de consommation d'énergie par unité de surface, et non à la maximisation de l'utilité. Le fait de fixer la consommation d'énergie du secteur résidentiel dans l'équilibre statique revient à faire l'hypothèse que ces consommations sont inélastiques aux variations de prix et de revenus sur le court terme et que l'adaptation des ménages dépend principalement de leurs choix d'équipements sur plusieurs années. Selon la logique du modèle, l'évolution de la consommation d'énergie du secteur résidentiel est donc déterminée à l'intérieur des modules dynamiques, en fonction des résultats des équilibres statiques précédents, en particulier les revenus des ménages et les prix des différentes énergies finales. Cette particularité permet d'alimenter la description technique de ce secteur à partir d'informations technologiques plus précises, même si la version actuelle du modèle reste relativement agrégée[27].

[27] Un module complet de désagrégation des postes de demandes, de l'acquisition des équipements, de leurs taux d'utilisation et des liens avec l'évolution climatique est en cours de développement mais n'a pu être inclus dans cette thèse.

La consommation d'énergie des ménages à l'intérieur des bâtiments résidentiels peut être directement reliée à la consommation de services énergétiques bien identifiés : les besoins de chauffage, de cuisson, d'eau chaude sanitaire, d'éclairage, de climatisation, de réfrigération et de congélation, et enfin les services fournis par l'utilisation des autres appareils électriques électroménagers « blancs » ou « bruns ». Le niveau de consommation d'énergie des ménages pour chaque service énergétique dépend simultanément (i) du prix du service, selon l'efficacité de l'équipement qui le fournit et le prix de l'énergie finale utilisée, (ii) du revenu des ménages, (iii) des caractéristiques physiques des logements (surfaces, isolation, conception architecturale).

La **surface habitable** par habitant évolue en fonction de la richesse des ménages par habitant, déterminée de façon endogène dans l'équilibre statique précédent. Nous supposons qu'il existe une asymptote de surface par habitant spécifique à chaque région, asymptote qui incorpore les contraintes spatiales, les choix de styles de développement et les habitudes culturelles. Dans la constitution des scénarios, les hypothèses sur ces asymptotes sont prises en cohérence avec celles qui concernent les infrastructures de transport, en gardant à l'esprit que toutes sont reliées aux politiques d'aménagement du territoire et des zones urbaines.

L'équation (3.36) donne l'évolution de la surface résidentielle par habitant en fonction de l'évolution du revenu par tête *Incomp_pc* entre les deux équilibres statiques précédents et d'une élasticité $\alpha_k(M2_pc)(t)$ qui décroît avec le niveau de surface par habitant *:*

$$M2_pc_k(t+1) = M2_pc_k(t) \cdot \left(1 + \alpha_k(M2_pc(t)) \cdot \frac{Income_pc_k(t)}{Income_pc_k(t-1)} \right) \quad (3.36)$$

La surface résidentielle totale $S_{k,housing}$ est le produit de cette surface par habitant et de la population totale. La surface résidentielle nouvellement construite est égale à la différence entre cette surface totale et la surface résidentielle ancienne dépréciée des surfaces en fin de vie (durée de vie $Life_time_{k,housing}$) :

$$S_new_{k,housing}(t) = S_{k,housing}(t+1) - S_{k,housing}(t) \cdot \left(1 - \frac{1}{Life_time_{k,housing}} \right) \quad (3.37)$$

L'intensité énergétique par m² dépend de la composition moyenne des équipements installés dans le parc d'habitation et des caractéristiques énergétiques du bâti, dont l'évolution dépend de choix technologiques des agents, en fonction des différents signaux économiques et des technologies disponibles.

Dans le **scénario de référence**, les consommations énergétiques par m², $\alpha^{m^2}_{k,ENER}(t+1)$, différenciées par type d'énergie et par région, évoluent selon des trajectoires exogènes calibrées sur des sorties du modèle énergétique POLES calculées en cohérence avec les trajectoires macroéconomiques d'IMACLIM-R lors d'exercices de couplage entre les deux modèles. Cette trajectoire encapsule les dynamiques d'évolution de l'équipement des ménages, de l'efficacité des équipements de conversion entre énergies finales et services énergétiques, et des caractéristiques physiques des bâtiments (isolation, ensoleillement, utilisation des énergies renouvelables).

Dans les **scénarios de réduction des émissions**, le signal prix du carbone induit des gains d'efficacité liés à la conception des bâtiments et à l'amélioration des équipements. Ces options technologiques sont schématisées à travers un unique type alternatif de logements étiqueté « *Très Basse Energie* » (TBE), dont la consommation annuelle d'énergie est supposée de 50kWh/m2, dont 80% d'électricité et 20% de gaz. En représentant de façon agrégée l'ensemble des technologies déjà existantes qui permettent d'atteindre ce seuil d'efficacité – de l'auto-production d'énergie à l'isolation efficace des bâtiments – nous envisageons surtout les politiques de rupture technologique envisagées aujourd'hui dans les pays développés pour lancer de grands plans de rénovation thermique et de durcissement de la réglementation. Suivant ce schéma, deux types de logements peuvent coexister au sein du parc : les logements standards *(BAU)* qui ont les mêmes caractéristiques énergétiques que ceux du scénario de référence et incorporent des gains d'efficacité énergétique progressifs et les logements « *Très Basse Energie* » *(TBE)* que nous venons de présenter. La vitesse de pénétration de ces bâtiments efficaces dans le parc est déterminée par deux formes réduites qui permettent de relier au niveau de la taxe carbone d'une part la part des logements *TBE* dans les constructions neuves (notée *share_TBE_new*) et d'autre part le taux annuel de rénovation du bâti existant standard (*share_renov_TBE*) pour le convertir en bâtiment *TBE,* avec un taux maximal fixé à 2,5%. Ce niveau est atteint pour un signal prix du carbone de 100$ par tonne de CO_2 et les bâtiments TBE commencent à pénétrer sur le marché à partir de 10$ par tonne de CO_2 (Figure 25).

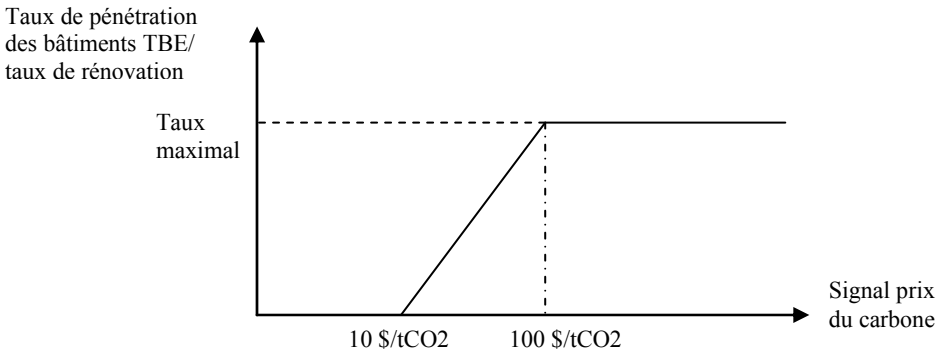


Figure 25 : Lien entre taxe carbone et pénétration des bâtiments TBE

Finalement, l'évolution des stocks de logements *BAU* et *TBE* s'obtient donc à partir des équations :

$$stock_m2_BAU(t+1) = stock_m2_BAU(t)\cdot\left(1-\frac{1}{Life_time_{k,housing}}-rate_renov_TBE(tax_CO_2)\right) + S_new_{k,housing}(t)\cdot(1-share_TBE_new(tax_CO_2)) \quad (3.38)$$

$$stock_m2_TBE(t+1) = stock_m2_TBE(t)\cdot\left(1 - \frac{1}{Life_time_{k,housing}}\right) + S_new_{k,housing}(t)\cdot share_TBE_new(tax_CO_2) + stock_m2_TBE(t)\cdot rate_renov_TBE(tax_CO_2) \quad (3.39)$$

avec :

$$stock_m2_BAU(1) = M2_pc(1)\cdot Ltot(1)$$
$$stock_m2_TBE(1) = 0$$
$$rate_renov_TBE(tax_CO_2) \le 0.025$$

Les consommations énergétiques par unité de surface à l'échelle du parc installé sont ensuite obtenues en faisant la moyenne des caractéristiques énergétiques des parcs de logements BAU et TBE, pondérées par leur part dans le parc total :

$$\alpha^{m^2}_{k,ENER}(t+1) = \frac{\alpha^{m^2,BAU}_{k,ENER}(t+1)\cdot stock_m2_BAU(t+1) + \alpha^{m^2,TBE}_{k,ENER}(t+1)\cdot stock_m2_TBE(t+1)}{stock_m2_BAU(t+1) + stock_m2_TBE(t+1)} \quad (3.40)$$

5.3 Transports

Dans l'équilibre statique, les transports de passagers et de marchandises sont caractérisés par les paramètres suivants :

- le niveau d'équipement des ménages en véhicules particuliers,
- l'efficacité de la flotte de véhicules particuliers,
- les capacités des différents modes de transport,
- les coefficients de consommations intermédiaires d'énergie dans les secteurs transports,
- les coefficients de consommations intermédiaires de transport dans tous les secteurs.

5.3.1 Véhicules particuliers : stock et intensité énergétique

L'évolution du taux de motorisation dans chaque région est fortement liée à l'évolution du revenu moyen par habitant et à celle de la distribution des revenus au sein de la population, mais est peu sensible aux variations de prix des carburants (Storchmann, 2005). La représentation de ce lien dans IMACLIM-R est calquée sur le modèle *SMP*, un modèle sectoriel de la consommation d'énergie du secteur des transports conjointement développé par l'Agence Internationale de l'Energie et le World Energy Council (Fulton et Eads, 2004). La particularité du modèle *SMP* est qu'il utilise une élasticité-revenu du taux de motorisation qui est variable en fonction du taux de motorisation, ce qui revient, en pratique, à une élasticité variant avec le revenu. Le calibrage de cette élasticité et de son évolution embarque les disparités régionales en termes d'aménagement du territoire, et les facteurs historiques et géographiques qui font que la corrélation entre niveau absolu de richesse et possession d'un véhicule n'est pas transposable d'une région à une autre. L'effet de saturation sur la possession de véhicules particuliers apparaît ainsi à un niveau de revenu moyen plus ou moins élevé

selon les régions. Dans IMACLIM-R, le taux de motorisation est relié à l'évolution du revenu disponible par habitant selon l'équation suivante :

$$CARS_pc_k(t+1) = CARS_pc_k(t) \cdot \left(1 + \alpha_k(CARS_pc_k(t)) \cdot \frac{Income_pc_k(t)}{Income_pc_k(t-1)} \right) \quad (3.41)$$

L'élasticité revenu α_k est reliée au taux de motorisation selon une formule adaptée du modèle *SMP* et schématisée sur la Figure 26. Dans les régions dont le revenu moyen en parités de pouvoir d'achat n'excède pas 5000 $ par an et par habitant, cette élasticité est maintenue égale à 0.3 quel que soit le taux de motorisation, afin de représenter les effets de seuil liés à l'accès à la mobilité automobile dans le développement des économies aujourd'hui les moins avancées. En multipliant *CARS_pc* par la population totale on obtient naturellement la taille du parc total, notée *CARS*. La taille de la flotte de véhicules particuliers conditionne ensuite la capacité de transport associée au mode automobile, paramètre pris en compte dans la contrainte de budget temps des ménages dans l'équilibre statique.

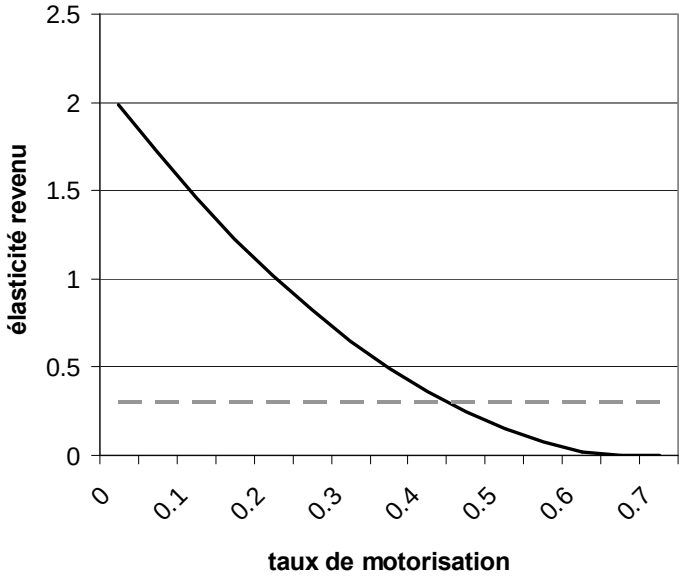


Figure 26 : Evolution de l'élasticité-revenu α_k en fonction du taux de motorisation.

L'efficacité de la flotte de véhicules particuliers dépend des choix technologiques des ménages lors de l'acquisition des véhicules et du progrès technique. La flotte automobile est détaillée en générations de véhicules, selon leur année de mise en circulation, et selon 4 types de véhicules : soit conventionnels, soit hybrides, avec dans les deux cas une déclinaison en technologie standard ou technologie améliorée. Cette représentation schématique, dans un esprit similaire aux choix de représentation des bâtiments, inclut des caractéristiques contrastées pour ces quatre types de véhicules – prix d'achat, efficacité énergétique, coûts de maintenance fixes et variables – calibrées à partir des données de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE, 2006), et évoluant dans le temps en fonction du progrès technique. La technologie hybride améliorée est supposée permettre des niveaux de consommation de l'ordre de 1.5 litres pour cent kilomètres. Elle peut donc être réinterprétée comme une moyenne de véhicules électriques et de véhicules hybrides rechargeables.

A chaque date, la **composition technologique de la nouvelle génération de véhicules** résulte d'un choix des agents parmi les quatre technologies explicites. Cet arbitrage s'effectue en comparant, pour chaque technologie disponible, le coût moyen actualisé associé à la production d'un véhicule.kilomètre avec le type de véhicule considéré. Ce coût moyen est calculé à partir des caractéristiques technologiques des différents types de véhicules, d'une manière similaire au calcul du coût complet des technologies de production d'électricité (*cf.* section 4.3.4). Pour cela les ménages formulent des anticipations myopes sur les futurs prix des énergies, c'est-à-dire qu'ils considèrent que les prix futurs sont égaux à ceux de l'équilibre statique précédent. En cas de mise en place d'une politique carbone explicite, les ménages anticipent parfaitement les futures valeurs de la taxe et l'ajoutent à leur scénario myope de prix des énergies. Le coût moyen actualisé de production d'un véhicule.kilomètre à partir d'une technologie identifiée, notée *TECH* dans ce qui suit, s'obtient selon l'équation (3.42) en sommant les coûts fixes et les coûts variables liés respectivement à la possession et à l'utilisation du véhicule. Les coûts fixes sont constitués du coût d'achat (noté $CINV_cars_{k,TECH}$) actualisé et des coûts fixes annuels liés à la possession du véhicule (par exemple l'assurance), tous deux ramenés au kilomètre parcouru à partir d'une hypothèse effectuée pour chaque région sur le parcours annuel moyen des véhicules (noté $average_km_per_year_k$). Les coûts variables rassemblent les coûts en carburant qui dépendent à la fois des scénarios de prix finaux anticipés (notés *p_fuel_anticip_taxed_cars*) et de la consommation du véhicule considéré par véhicule.kilomètre (notée $\alpha_{k,ENER}^{CAR,TECH}$). Dans tous ces calculs, le taux d'actualisation adopté par les ménages, noté $disc_{k,CAR}$, est fixé comme une hypothèse de scénario, entre 0.12 et 0.18, selon les régions.

$$\begin{aligned} LC_{k,TECH} = & \frac{CRF_cars_{k,TECH}.CINV_cars_{k,TECH} + OM_fixed_cars_{k,TECH}}{average_km_per_year_k} \\ & + CRF_cars_{k,TECH}.\sum_{i=1}^{life_time_{k,CAR}} \left(\frac{p_fuel_anticip_taxed_cars_k(t+i)\cdot\alpha_{k,ENER}^{CARS,TECH}}{\left(1+disc_cars_{k,TECH}\right)^i} \right) \\ & + OM_var_cars_{k,TECH} \end{aligned} \quad (3.42)$$

avec :

$$CRF_cars_{k,TECH} = \frac{disc_cars_{k,TECH}}{\left(1-\left(1+disc_cars_{k,TECH}\right)^{-life_time_{k,CAR}}\right)} \quad (3.43)$$

Les parts de marché de chaque technologie sur l'ensemble des nouveaux véhicules produits à la période courant s'obtiennent ensuite par une fonction de part qui permet de prendre en compte les hétérogénéités des choix des ménages et la coexistence sur le marché de plusieurs types de véhicules différents (Clarke et Edmonds, 1993) :

$$MS_cars_{k,TECH} = \frac{LC_{k,TECH}^{-\gamma_{k,CARS}}}{\sum_{TECH_j}\left(LC_{k,TECH_j}^{-\gamma_{k,CARS}}\right)} \quad (3.44)$$

Ces parts sont ensuite appliquées à la nouvelle génération de véhicules *CAR_new*, obtenu par différence entre la nouvelle taille totale du parc *CARS* et l'ancien parc déprécié.

Finalement, la **nouvelle intensité énergétique moyenne du transport automobile** (exprimée en Mtep par passager.kilomètre) est obtenue en tenant compte de la composition du parc et des niveaux d'utilisation des différentes générations et types de véhicules :

$$\alpha_{k,ENER}^{CARS}(t+1) = \frac{\sum_{TECH}\left(\sum_{j=1}^{life_time_{k,CARS}} CARS_{TECH,k}^{vintage}(t+j)\cdot \frac{\alpha_{k,ENER}^{vintage,CARS}(t+j)\cdot on_road_gap_factor_k}{occupancy_k}\right)}{\sum_{TECH}\left(\sum_{j=1}^{life_time_{k,CARS}} CARS_{TECH,k}^{vintage}(t+j)\right)} \quad (3.45)$$

Cette équation inclut deux paramètres comportementaux tirés du modèle *SMP* et nécessaires pour passer des consommations théoriques des types de véhicules à l'intensité énergétique moyenne du parc : le taux d'occupation moyen des véhicules, noté $occupancy_k$, et le rapport entre la consommation théorique des véhicules et la consommation réelle effectivement observée, noté $on_road_gap_factor_k$.

5.3.2 Autres moyens de transport : capacités et consommations d'énergie

Pour le transport de passager, **l'évolution des paramètres de *capacité* de transport** intégrés dans le calcul du budget temps de l'équilibre statique est directement liée à l'évolution des infrastructures de transport, selon des routines de décisions publiques et privées. Par défaut ces décisions financent des capacités suivant l'augmentation tendancielle de la demande, soit explicitement à travers la dépense de l'état en infrastructures routières, soit *via* les décisions d'investissement des secteurs transport. L'évolution des niveaux de capacité modifie ensuite l' « efficacité-temps » des différents modes dans le calcul du budget-temps (Figure 27).

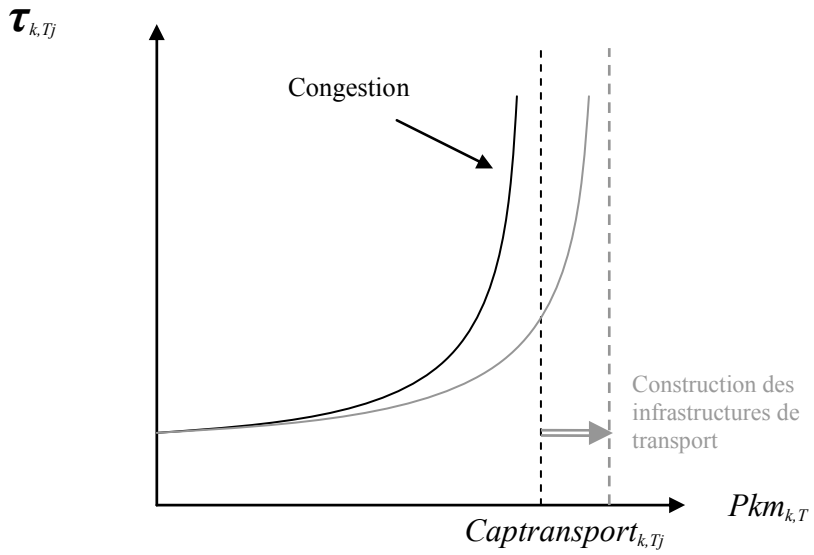


Figure 27 : Effet de l'extension des capacités sur l'efficacité marginale en temps des transports

Les **consommations intermédiaires d'énergie des transports** non automobiles répondent à des formes réduites simples d'amélioration de l'efficacité :

- Dans le secteur aérien, les consommations intermédiaires d'énergie suivent une tendance autonome à la décroissance de 0.7% par an, qui reflète à la fois les avancées effectuées sur la conception des aéronefs pour diminuer leur consommation et l'amélioration du remplissage moyen des avions *via* des mesures d'organisation du trafic et des dessertes.
- Dans le secteur maritime, les consommations intermédiaires d'énergie par unité transportée restent inchangées.
- Dans le secteur des transports terrestres de fret et de passagers, la consommation moyenne de carburants liquides évolue en fonction d'une élasticité aux prix des carburants $elast_Et_OT_k$, fixée à -0.3, avec une asymptote fixée à 25% de la valeur initiale de ces paramètres (3.46). Cette représentation agrégée est une étape préliminaire vers une représentation plus détaillée du secteur en sous-secteurs. En effet, dans la version actuelle, le « transport public terrestre » regroupe à la fois du fret routier et ferroviaire et du transport de passagers routier (bus) et ferroviaire. Ce niveau d'agrégation résulte directement du format de la base de donnée GTAP sur laquelle s'appuie le calibrage du modèle et qui n'effectue pas de différence entre les différents sous-secteurs de transport qui constituent le secteur agrégé. L'évolution dynamique des consommations intermédiaires énergétiques de ce secteur rassemble donc à la fois des progrès technologiques sur les véhicules, des transferts modaux (en particulier pour le fret entre la route et le rail) et des modifications de la composition structurelle de ce secteur qui découlent de changements dans les poids relatifs des sous-secteurs qui le composent.

$$IC_new_{Et,Other\ Trans,k} = max\left(IC_{Et,Other\ Trans,k}(1) \cdot \left(\frac{pIC_{Et,Other\ Trans,k}(t)}{pIC_{Et,Other\ Trans,k}(1)} \right)^{elast_Et_OT_k}, IC_{Et,Other\ Trans,k}(1) \cdot Asympt_Et_OT_k \right) \quad (3.46)$$

5.3.3 Evolution de la demande de transport par les autres secteurs

Le contenu en fret de la croissance économique est directement relié, dans le modèle, à l'évolution des coefficients de consommation intermédiaire de transport de tous les autres secteurs productifs de l'économie. La forme de la structure des coûts de production du transport de fret permet d'amortir significativement l'impact d'une variation des prix des énergies sur le prix final du transport facturé aux secteurs productifs. Et compte tenu de l'importance de l'incertitude qui pèse sur l'évaluation de la réaction des entreprises à des variations, assez minimes, des prix du transport dans leur décision d'organisation de la production, nous avons décidé de fixer l'évolution de ces paramètres de façon exogène comme des variables de scénario. Ainsi, dans la spécification de référence, conformément aux tendances historiquement observées, ces coefficients de consommation intermédiaire sont maintenus constants. Dans les scénarios avec politiques climatiques, les hypothèses de réorganisation des activités ou des zones urbaines peuvent nous conduire à supposer un découplage de la consommation de transport et de la croissance.

6 Le progrès technique

L'induction du changement technique par les conditions de marché intervient sur différents paramètres en fonction des modules dynamiques sectoriels.

Lorsque l'évolution dynamique des coefficients techniques énergétiques est associée à une procédure de choix des agents économiques parmi des portefeuilles de technologies identifiées nous pouvons intégrer dans notre cadre de modélisation les spécificités communément adoptées dans les modèles « *bottom-up* » du secteur énergétique pour effectuer une description endogène du progrès technique. L'évolution dynamique du coût en capital des technologies concernées est ainsi reliée au cumul des capacités installées *via* des courbes d'apprentissage mondiales qui sont caractérisées par un taux d'apprentissage constant et une asymptote limite à la décroissance des coûts (*cf.* chapitre 1, section 2.3.1). Le choix d'une courbe d'apprentissage à l'échelle mondiale traduit une hypothèse de diffusion parfaite de l'innovation entre les différentes régions et sous-entend la présence d'externalités positives de connaissance importantes associées à ces progrès. Le secteur de la production d'électricité et les véhicules automobiles sont concernés par cette spécification. Dans le secteur de la production d'électricité, le processus d'apprentissage qui permet la décroissance du coût en capital des technologies est aussi associé à une amélioration de leur rendement avec des marges de progrès pour ces paramètres qui sont calibrées sur le modèle du secteur énergétique POLES (LEPII-EPE, 2006).

Nous avons adopté une stratégie de modélisation différente lorsque l'évolution des coefficients techniques énergétiques n'est pas associée à une procédure de choix des agents parmi des technologies identifiées. Dans ces cas, l'évolution des coefficients techniques est déterminée, à

l'échelle de chaque secteur, par une fonction de réaction aux niveaux des prix des énergies ou de la taxe carbone. Cette spécification s'applique en particulier pour les cœfficients techniques des secteurs de l'industrie, de l'agriculture et des services (*cf.* section 5.1) ainsi que pour les consommations d'énergies associées aux usages résidentiels (*cf.* section 5.2). Dans ces cas, nous avons choisi de mettre en place des courbes d'apprentissage qui modifient la forme des fonctions de réaction sectorielles.

Pour les **secteurs de production** (industrie, agriculture, services), l'apprentissage concerne le niveau de taxe carbone minimal permettant d'obtenir une valeur maximale pour les gains annuels supplémentaires. La décroissance de ce niveau de taxe est paramétrée par une hypothèse sur le taux d'apprentissage et reliée à l'évolution du cumul des capacités de production installées qui ont bénéficié des gains supplémentaires d'efficacité énergétique. Nous formulons aussi une hypothèse sur un niveau d'asymptote en dessous de laquelle le niveau de taxe minimal ne peut pas descendre. Ainsi le niveau de taxe de 150 $/tCO$_2$ qui permet d'obtenir des gains d'efficacité énergétique de 2,5 % par an s'ajoutant à la trajectoire d'amélioration autonome d'efficacité énergétique (*cf.* section 5.1 pour une description de la fonction) peut décroître jusqu'à la valeur limite de 75 $/tCO$_2$ avec un taux d'apprentissage de 8%. Comme pour les autres technologies, la courbe d'apprentissage est mondiale.

Pour le **secteur résidentiel**, l'apprentissage concerne le niveau minimal de taxe assurant un taux de pénétration maximal des bâtiments « très basse énergie » dans les nouvelles constructions (*cf.* section 5.2). Ce niveau minimal de taxe est initialement fixé à 100 $/tCO$_2$ mais peut décroître, avec un taux d'apprentissage égal à 8%, jusqu'à 50 $/tCO$_2$ en fonction de l'évolution du cumul des surfaces de logement « très basse énergie » déjà construites.

Conclusion

Cette description des modules dynamiques technico-économiques met en évidence à la fois la **flexibilité** du modèle pour la représentation des univers techniques dans chaque secteur et la **complexité** de l'entreprise de représentation de l'évolution de tous les coefficients techniques. Contrairement aux modèles macroéconomiques usuels, dans lesquels la définition des élasticités de substitution suffit à déterminer l'ensemble des évolutions techniques tout au long de la trajectoire, il est ici nécessaire de représenter l'évolution des coefficients techniques un par un.

De ce point de vue, le développement du modèle est aujourd'hui à un stade intermédiaire, dans lequel certains modules ont pu faire l'objet d'un travail spécifique permettant de détailler les dynamiques technico-économiques à un niveau de désagrégation satisfaisant – par exemple les ressources pétrolières, le secteur électrique – tandis que d'autres sont encore traités avec un niveau d'agrégation élevé, qui ne permet pas de les adosser à une représentation discrète de technologies identifiées – par exemple le secteur résidentiel ou le transport terrestre. Cet avancement hétérogène est supposé être progressivement corrigé dans les années qui viennent, avec de nombreux projets qui visent à développer de nouveaux modules désagrégés : un module résidentiel détaillé (projet GICC), une désagrégation du secteur industrie pour mettre en évidence les secteurs clés de la sidérurgie et de la production de ciment et un ensemble limité de technologies dans ces secteurs

(projet FONDDRI), une désagrégation du secteur transport terrestre entre fret et transport de passagers, un module d'usage des sols (projet DECLIC), l'addition d'un cycle du carbone et d'un module climatique compact pour intégrer l'effet du changement climatique à moyen terme (projet GICC).

Il serait tentant de croire que ces développements iront de pair avec une complexification croissante rendant de plus en plus opaque les résultats et les déterminants des émissions à long terme. Notre expérience nous laisse croire que c'est le contraire : le développement maîtrisé d'un module désagrégé, dans lequel les évolutions technico-économiques sont reliées de manière cohérente aux signaux prix endogènes au modèle, aux contraintes de revenu et d'investissement, ainsi qu'aux potentiels techniques identifiés par des études technico-économiques, renforce la robustesse et la tangibilité des résultats, en permettant une validation progressive par les experts sectoriels et une meilleure assimilation par les décideurs.

Bibliographie

AIE, 2004, “World Energy Outlook”, *IEA/OECD*, Paris, France.

AIE, 2006, “Energy Technology Perspectives: Scenarios and Strategies to 2050”, *OECD/IEA* , Paris, France.

AIE, 2007, “World Energy Outlook”, *IEA/OECD*, Paris, France.

Azar C., Dowlatabadi, H., 1999, “A Review of Technical Change in Assessments of Climate Policy”, *Annual Review of Energy and the Environment* 24: pp 513-44

Bardi, U., 2005, “The mineral economy: a model for the shape of oil production curves”, *Energy Policy* 33, pp. 53-61.

Bentley, R.W., 2002, “Global oil & gas depletion: an overview”, *Energy Policy* 30 3, pp. 189-205.

Clarke, J., F., Edmonds, J. A. (1993) Modelling energy technologies in a competitive market *Energy Economics*, Volume 15, Issue 2, Pages 123-129

Fulton L. and Eads G., IEA/SMP Model Documentation and Reference Case Projection, July 2004 http://www.wbcsd.org/web/publications/mobility/smp-model-document.pdf

Grübler A., Nakićenović N., Nordhaus W. D. (Eds.), 2002, *Technological Change and the Environment,* Washington, DC, Resources for the Future.

Hotelling, H., 1931, “The economics of exhaustible resources”, *The Journal of Energy and Development* 39 (2), 137-175.

Hubbert, M.K., 1956, “Nuclear energy and the fossil fuels”, *Drilling and Production Practice. American Petroleum Institute*, pp. 7-25.

Hubbert, M.K., 1962, “Energy Resources”, *A Report to the Committee on Natural Resources. National Academy of Science*, Government Printing Office, Publication No. 1000-D.

Labriet, M., Loulou, R., Kanudia, A., Vaillancourt, K., 2004, “The advanced world markal Model: Description of the inputs”, *Les Cahiers du GERAD*.

Laherrère, J.H., 2001, “Forecasting future production from past discovery”. http://www.hubbertpeak.com/laherrere/opec2001.pdf

Laherrère, J.H., 2003, “Future of oil supplies”, http://www.oilcrisis.com/laherrere/zurich.pdf.

LEPII-EPE, 2006, “The POLES model”, *Institut d’Économie et de Politique de l’Énergie*, Grenoble, France, 12 pp. http://webu2.upmf-grenoble.fr/iepe/textes/POLES12p_Jan06.pdf (accédé le 12/04/2008)

Rao S., Keppo I., Riahi K., 2006, “Importance of technological change and spillovers in long term climate policy”, *The Energy Journal*, (Special issue on Endogenous Technological Change and the Economics of Atmospheric Stabilisation), pp 55–72.

Rehrl T., Friedrich R., 2006, Modelling long-term oil price and extraction with a Hubbert approach: The LOPEX model, *Energy Policy*, 34(15) , pp. 2413-2428.

Rogner, H., 1997, “An assessment of world hydrocarbon resources”, *Annual Review of Energy and the Environment,* 22, pp. 217-262.

Sims, R.E.H. , R.N. Schock, A. Adegbululgbe, J. Fenhann, I. Konstantinaviciute, W. Moomaw, H.B. Nimir, B. Schlamadinger, J. Torres-Martínez, C. Turner, Y. Uchiyama, S.J.V. Vuori, N. Wamukonya, X. Zhang, 2007, “Energy supply”, *In Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Storchmann, K., 2005, “Long-run gasoline demand for passenger cars: the role of income distribution”, *Energy Economics* **27**, pp. 25-58.

Szklo, A., Machado, G., Schaeffer, R., 2007, “Future oil production in Brazil—estimates based on a Hubbert model”, *Energy Policy* 35, pp. 2360-2367.

Chapitre 4

Une trajectoire de référence : leçons d'une modélisation hybride avec progrès technique endogène

Table des matières

1 UN RAPIDE RETOUR SUR L'EXERCICE DE MODELISATION SRES 157

2 QUEL CONTENU MATERIEL DE LA CROISSANCE DANS UN SCENARIO « CENTRAL » ? 163

2.1 UNE VISION AGREGEE DE LA RICHESSE MONDIALE 163
2.2 UNE TRADUCTION EN TERMES DE CONTENU MATERIEL ET DE CHANGEMENT STRUCTUREL 167

3 CONSOMMATION D'ENERGIE ET PRIX RELATIFS 174

3.1 LA STRUCTURE DE LA DEMANDE FINALE CHANGE AU COURS DU TEMPS 174
3.2 CONTRAINTES SUR LA MISE A DISPOSITION DES RESSOURCES PETROLIERES, DE LEURS SUBSTITUTS ET PRIX DES ENERGIES FOSSILES 177
3.3 L'EVOLUTION DU SYSTEME ELECTRIQUE 183

4 NIVEAU ET COMPOSITION DE LA TRAJECTOIRE D'EMISSION 185

4.1 DES EMISSIONS EN FORTE CROISSANCE 185
4.2 UNE INTERPRETATION EN TERMES D'IDENTITE DE KAYA 188

BIBLIOGRAPHIE 193

Pour la question du changement climatique, les trajectoires de référence revêtent une importance capitale. D'une part, elles servent de fondement aux simulations climatiques visant à évaluer les modifications futures du climat et les dommages qui y sont liés. D'autre part, dans l'étude des trajectoires de réduction des émissions de gaz à effet de serre, le recours à un ou plusieurs scénarios de référence est un point de départ systématique. Il est admis depuis longtemps que le coût de l'atteinte d'un objectif donné de concentration des GES dépend du niveau des émissions en l'absence de politiques climatiques. Mais on s'est le plus souvent contenté de cette observation triviale (les coûts sont fonction du niveau d'abattement nécessaire) en laissant de côté des questionnements plus fins et en définitive très utiles pour la décision : il s'agit (i) de déterminer la combinaison des mécanismes qui préside à la trajectoire d'émission et, dans ces mécanismes (ii) d'identifier les risques de bifurcation vers des trajectoires fortement carbonées qui pourraient interdire certains objectifs politiques à des coûts acceptables, (iii) d'évaluer le degré de sous-optimalité de la trajectoire de référence qui détermine le coût net des politiques (iv) et enfin d'effectuer la distinction, à chaque niveau, entre les paramètres qui relèvent strictement du jeu énergétique et ceux qui relèvent de dynamiques importantes dans lesquelles les prix de l'énergie ne jouent qu'un rôle de second ordre.

L'activité de modélisation dans le domaine du changement climatique a été extrêmement soutenue au cours des trente dernières années. Pour donner une idée de la profusion des travaux menant à la production de trajectoires de référence, nous pouvons rappeler qu'en 1998, la base de données rassemblée par le GIEC en vue de préparer l'exercice SRES (Morita et Lee, 1997) contenait déjà 428 scénarios. Si l'on compte les scénarios avec politiques climatiques, ce chiffre atteint 725 en 2006. Les difficultés pour exploiter une telle profusion de scénarios expliquent en partie le rôle de référence pérenne qu'ont tenu et que conservent encore les deux exercices de modélisation majeurs, coordonnés par le GIEC dans les années 90 : le premier a été publié en 1992 (Legget et *al.*, 1992) sous l'appellation IS 92, le second a été publié en 2000 (Nakicenovic et *al.*, 2000) dans le rapport *Special Report on Emission Scenario*. Les scénarios SRES sont ainsi encore aujourd'hui massivement utilisés tant pour les simulations climatiques que pour servir de base au calcul de scénarios de réduction des émissions. Cette position de référence s'explique par la légitimité du GIEC pour coordonner et valider les travaux scientifiques nécessaires à la production de ces scénarios, mais aussi par l'ambition affichée de fournir un jeu de scénarios représentatifs des intervalles d'incertitude en jeu sur les grandes variables agrégées.

L'objectif semblait atteint puisque les émissions annuelles de CO_2 en 2100 s'échelonnent sur un intervalle situé entre 4,3 et 36,8 gigatonnes de carbone. Mais c'est l'ampleur même de cet intervalle qui attira aux scénarios SRES le plus de critiques, certains accusant même ces scénarios de donner des fourchettes non plausibles et dont l'effet d'optique pouvait être dangereux en débouchant, une fois injectés dans des simulations climatiques, sur des hausses de températures très élevées et sur une surestimation des risques.

Le besoin d'un renouvellement de la réflexion méthodologique sur l'écriture des scénarios apparaît clairement dans l'écart entre cette vague de critiques et le fait que les tendances en cours révèlent une situation pour le moins inquiétante (Raupach et *al.*, 2007) : malgré l'intervalle d'incertitude très vaste balayé par les scénarios SRES, les émissions réelles sont aujourd'hui ***au dessus*** de la trajectoire la plus intensive en carbone qu'ils proposaient (Figure 28).

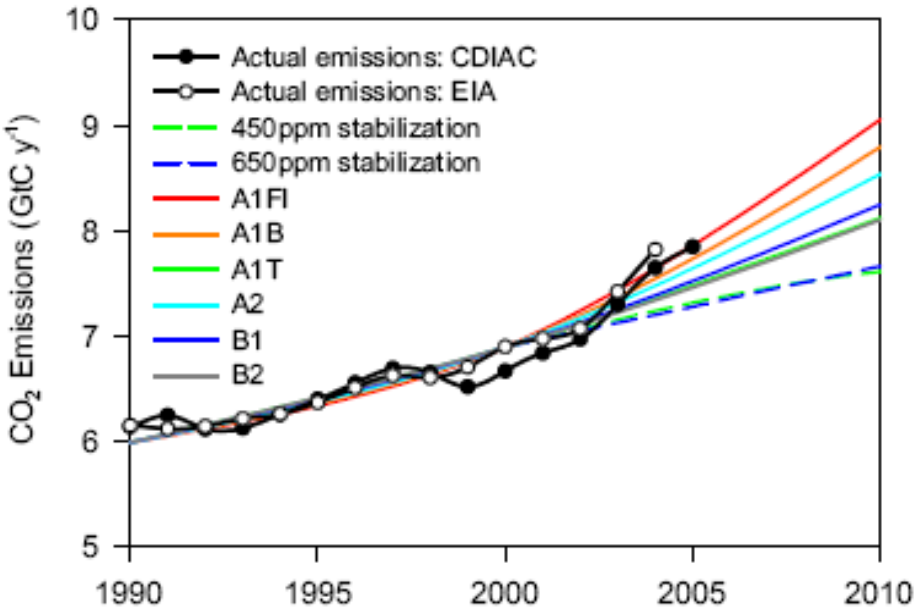


Figure 28 : Emissions de CO_2 réelles évaluées par deux organismes différents (EIA : US Department of Energy Energy Information Administration, CDIAC US Department of Energy Carbon Dioxide Information and Analysis Center), trajectoires d'émission des scénarios SRES, trajectoires d'émission en vue d'une stabilisation de la concentration à 450 ou 650 ppm. Source Raupach et *al.* 2007.

La sous-évaluation des trajectoires d'émissions à court terme par les modèles qui ont servi à produire les scénarios SRES peut trouver sa source dans quelques éléments principaux :

- La chute de l'Union Soviétique au début des années 90 a engendré une baisse considérable des émissions pour les anciens pays du bloc communiste, et, comme la dépression économique de ces pays a été de longue durée, les modèles ont le plus souvent sous-estimé le rythme de la reprise.
- La vigueur et la durée de l'explosion économique en Chine et à un degré moindre en Inde, ont été longtemps sous-estimées.
- Un relatif optimisme a présidé quant à la capacité des pays de l'OCDE de découpler demande énergétique et croissance économique, en particulier sous l'effet des politiques d'environnement ou de sécurité énergétique.
- A cela se rajoute un paramètre plus politique car le niveau des émissions dans la trajectoire de référence a un impact immédiat sur les négociations climatiques dans la mesure où c'est lui qui va déterminer le niveau des dommages en cas de non-action. Les pays opposés à l'action de mitigation du changement climatique à court terme avaient donc tout intérêt à s'opposer à la publication de scénarios élevés en émissions dans le rapport SRES. Ceci a sûrement conduit à négliger en partie l'importance de certains scénarios intensifs en carbone qui avaient pourtant été produits par les équipes de modélisation telle que la variante C, intensive en charbon, du scénario SRES A1 présentée dans Roehrl et Riahi (2000).

Certes, les oscillations de la conjoncture peuvent très bien ramener les émissions réelles à l'intérieur du corridor des scénarios SRES. Mais s'en tenir là est peu satisfaisant et c'est pourquoi

nous préférons dans ce chapitre essayer de comprendre plus en profondeur la nature des mécanismes susceptibles d'exercer une force de rappel vers le haut des trajectoires d'émissions. Pour ce faire, nous nous concentrons ici sur un seul scénario de référence, étant entendu qu'il n'est qu'un des multiples scénarios intéressants à analyser, sur quoi nous reviendrons dans le chapitre qui suit. Ce scénario a la particularité d'aboutir à une trajectoire élevée en émissions (au dessus des quatre scénarios marqueurs SRES) malgré un jeu d'hypothèses exogènes dans la moyenne des intervalles d'incertitude habituellement proposés dans la littérature. Partant de là, nous allons déterminer dans ce chapitre et celui qui suit si cette trajectoire intensive en carbone procède du choix d'une combinaison particulière de paramètres ou bien de mécanismes endogènes dont la résultante conduit à un niveau élevé d'émissions. Cette évaluation tiendra particulièrement compte de la spécificité du modèle IMACLIM-R qui allie une modélisation hybride du système énergie-économie à une représentation endogène du changement structurel. Nous nous efforcerons dans ce qui suit de souligner les apports de ce type de modélisation dans l'étude d'une trajectoire de référence.

La première partie de ce chapitre revient sur les enseignements à tirer de l'exercice de modélisation SRES. Nous présenterons dans la deuxième partie les résultats obtenus dans notre scénario de référence pour la croissance économique et son contenu matériel, nous continuerons dans la troisième partie avec l'explication des dynamiques énergétiques sous jacentes et nous finirons dans la quatrième en étudiant la trajectoire d'émission de CO_2 qui y est associée.

1 Un rapide retour sur l'exercice de modélisation SRES

Pour les protagonistes de l'exercice SRES, il s'agissait à l'époque de couvrir l'univers des possibles en tenant compte non seulement des incertitudes techniques mais aussi de visions différentes concernant l'avenir de la mondialisation économique et des types de développement. Cette approche permettait de réaffirmer au passage qu'à l'horizon de plusieurs décennies, il est illusoire de définir « le » scénario de référence le plus probable par une extrapolation raisonnée des tendances passées. La méthode adoptée consistait à construire plusieurs familles de scénarios alternatifs comparables, sans se prononcer sur leur probabilité d'occurrence. A partir de quatre récits (*storylines*) combinant des pronostics différents sur la mondialisation (intégration et convergence *vs* fragmentation) et sur le type de développement (productivisme *vs* croissance égalitaire et environnementale), chacune des six équipes impliquées a produit une projection quantitative. Parmi l'ensemble des 40 scénarios ainsi générés[28], six scénarios *marqueurs* furent retenus par souci de clarté. Finalement, l'atout principal de ce jeu de scénarios était de s'appuyer sur une démarche qui se voulait cohérente, explicitement destinée à traduire des visions contrastées et explicites du monde futur et à capter l'ampleur des incertitudes de l'époque.

[28] Pour certains scénarios, des équipes de modélisation ont produits des variantes, ce qui porte le nombre de scénarios à 40. Par exemple le scénario A1 a été décliné en cinq versions de mix en énergie primaire : T (technologies), C (Coal), G (pétrole et gaz), FI (tous fossiles), B (mixte).

Malgré la rigueur et le déroulement remarquable de cette entreprise, les résultats qu'il a fournis n'ont pas manqué de susciter un certain scepticisme :

a. **Sur l'ensemble des scénarios**, les émissions de CO_2 en 2100 s'échelonnent sur un intervalle considérable entre 4,3 et 36,8 gigatonnes de carbone (à comparer aux émissions de 6,0 GtC en 1990) : est-ce plausible que l'univers des possibles soit, au niveau des tendances agrégées, aussi large que suggéré par de tels intervalles d'incertitude ? est-ce crédible d'afficher une limite basse à 4,3 GtC dans la mesure où tous les scénarios sont censés exclure une politique climatique explicite ?

b. **Pour chaque récit**, les différences de « traduction » de scénarios qualitatifs identiques au départ, combinées aux différences « techniques » des modèles utilisés, ont débouché sur des fourchettes de scénarios d'émissions dont l'ampleur, mise en évidence dans la Figure 29, pose question sur la fiabilité des travaux : en 2100 les émissions des scénarios de type A2 s'échelonnent entre 17,6 et 33,4 GtC et celles des scénarios de type B2 entre 9,3 et 23,1 GtC. Un tel éventail de résultats pour un même « récit » pose un problème de crédibilité de l'exercice même de modélisation : est-il dû à des différences de paramétrage, à la structure interne des modèles ou reflète-t-il les incertitudes du monde réel ? En l'état, il laisse l'utilisateur quelque peu perplexe puisqu'il ne sait pas vraiment quelle attitude adopter face à une fourchette d'incertitude si large.

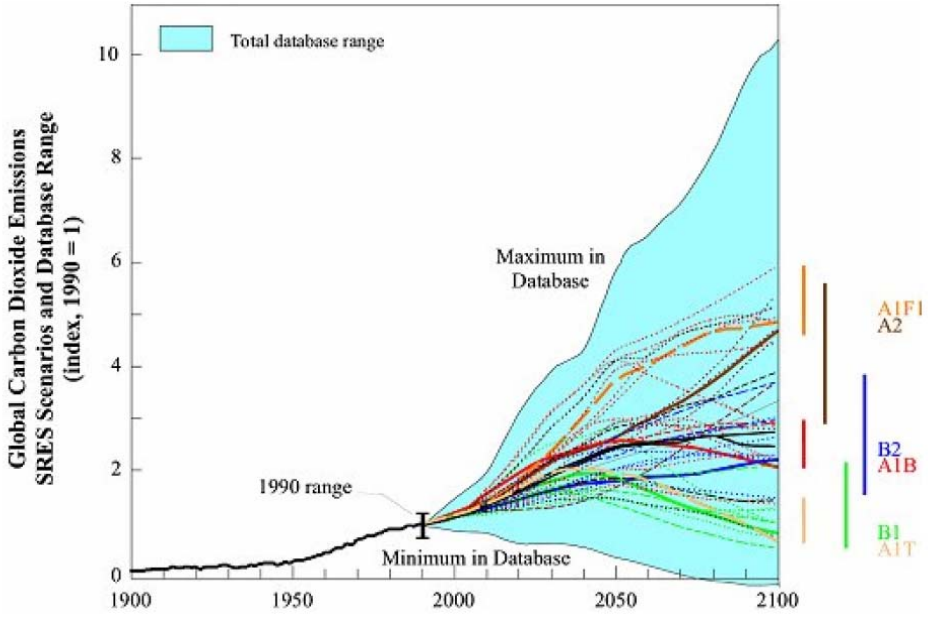


Figure 29 : Scénarios d'émissions « SRES »
Émissions de CO_2, en indice (indice 1=1990)

Une partie de la réponse à cette question réside dans la nécessité, reconnue depuis longtemps et qui n'est pas toujours intégrée dans les débats publics ni même dans nombre de travaux scientifiques, d'adopter une approche séquentielle de la décision. Mais une autre partie est à

rechercher dans le fait que cette explosion de l'incertitude, même au sein d'un exercice coordonné, peut s'expliquer par la difficulté de mettre en cohérence des paramètres, et ceci à deux niveaux :

- ***Une harmonisation inachevée des composantes de l'identité de Kaya***

Les difficultés de traduire de façon *homogène* des récits qualitatifs en paramétrage des modèles peuvent être à l'origine de différences importantes à l'horizon 2100. En fait, dans un tel exercice de collaboration entre équipes de modélisation, on distingue deux types de paramètres : ceux sur lesquels il est envisageable de procéder à une harmonisation complète au sein des scénarios décrivant un même récit qualitatif, en forçant les modèles à suivre la même trajectoire exogène (par exemple population, PIB, énergie finale), et ceux sur lesquels, pour des raisons de faisabilité pratique de l'exercice, chaque équipe de modélisation garde de toute façon une maîtrise indépendante, en tentant de respecter les récits qualitatifs. Pour faciliter l'analyse de la logique interne des scénarios produits, les équipes ont eu recours à l'identité « de Kaya »[29] (3.47), qui permet de décomposer l'évolution des émissions selon la population, l'activité économique (PIB par tête) et la structure du système énergétique (intensité énergétique du PIB et intensité carbone du panier énergétique).

$$Emissions = Population \times \frac{PIB}{Population} \times \frac{Energie}{PIB} \times \frac{Emissions}{Energie} \qquad (3.47)$$

En fait, une harmonisation partielle des trajectoires de PIB, de population et d'énergie finale a été réalisée, mais, faute de temps, les itérations nécessaires pour parvenir à une harmonisation totale entre les modèles n'ont pu avoir lieu avant la publication du rapport. Si elle avait pu être réalisée, cette harmonisation des trois premiers composants de l'identité de Kaya n'aurait laissé comme lieu de divergence possible entre les modèles que le contenu carbone de l'énergie primaire, ce qui aurait fortement limité les intervalles d'émissions en 2100 pour un même « récit » en amont.
Sur des projections à l'horizon d'un siècle, il est inévitable qu'une harmonisation inachevée des composants de l'identité de Kaya crée des divergences considérables. Il suffit de réaliser quelques calculs assez simples pour s'en convaincre : nous avons combiné dans le Tableau 6, des variations raisonnables sur le taux de croissance de la productivité globale (1% par an, ± 0.1% par an) et sur le taux de décarbonisation agrégée de l'économie (2% par an, ± 0.1% par an). On observe immédiatement que les scénarios extrêmes dessinent un intervalle d'émissions très large, même avec des écarts qui semblent assez faibles sur les hypothèses : un scénario avec 0.9 % par an de croissance de la productivité générale et 2.1% de taux de découplage entre émissions et PIB conduit

[29] Identité aussi connue, dans la littérature environnementale, sous le sigle IPAT (Holdren, 2000), pour signifier que les impacts environnementaux (I) dérivent de l'influence conjointe du niveau de population (P), de son niveau d'activité (A) et de l'état des technologies (T). Le premier utilisateur de cette identité fut B. Commoner (1971) dans son ouvrage « *The closing circle* », au début des années soixante dix.

sur le siècle à un cumul d'émissions de CO_2 de 1530 Gt contre 2229 Gt pour un scénario avec 1.1% et 1.9 % pour les mêmes coefficients.

		Taux de découplage CO_2/PIB		
		1.9 % /an	**2.0 % /an**	**2.1 % /an**
Taux de croissance de la productivité globale	**0.9 % par an**	1733 GtC	1628 GtC	**1530 GtC**
	1.0 % par an	1992 GtC	1868 GtC	1753 GtC
	1.1 % par an	**2229 GtC**	2152 GtC	2016 GtC

Tableau 6 : Budget carbone 2000-2100 à partir de variantes sur l'identité de Kaya

Il serait naïf de conclure que cet écueil serait surmonté en allant au bout de l'harmonisation des modèles. En cas d'harmonisation complète, où les modèles sont contraints de respecter des projections exogènes pour 3 des 4 composants de l'identité de Kaya, l'exercice de modélisation devient lui-même inutile et ne rajoute rien par rapport à un simple calcul de « coin de table » qui conduirait au même résultat à moindre coût. En fait, ceci renvoie à une ambiguïté gênante sur le concept même de scénarios cohérents. Si les scénarios réalisés consistent en une juxtaposition d'hypothèses numériques exogènes censées traduire des *récits,* la seule utilité des modèles serait alors d'invalider certains assemblages improbables. Si toutes les combinatoires sont plausibles, alors l'utilité des modèles est toute relative.

- ***Cohérence des scénarios et limite de « l'état de l'art »***

Cette harmonisation « par le haut », qui consiste uniquement à forcer les modèles à respecter des tendances agrégées sur la croissance économique et son contenu énergétique, ne permet en fait qu'un contrôle de plausibilité très lâche, parce qu'un grand nombre de combinaisons est susceptible de survivre à ce test *a priori*, comme nous l'avons illustré dans le Tableau 6. Pour éviter ce piège combinatoire, il faut bien contrôler la cohérence *interne* des projections, au niveau des mécanismes sous-jacents : gains de productivité, renouvellement du capital, pénétration des nouvelles technologies, évolution de la mobilité, épuisement des ressources fossiles, etc.

En fait, c'est presque une tautologie de rappeler que les dynamiques représentées dans l'identité de Kaya ne sont pas indépendantes ! Les modélisateurs en sont parfaitement conscients : l'examen des interdépendances faisait explicitement partie du cahier des charges du GIEC pour l'exercice SRES afin d'améliorer la méthodologie utilisée pour les précédents scénarios IS92, et le chapitre 3 du rapport SRES contient une énumération qualitative précise de ces interdépendances. Le problème de cohérence des scénarios SRES ne vient donc pas d'une négligence plus ou moins volontaire des enjeux de cohérence, il faut plutôt l'attribuer au fait que les modèles disponibles ont des capacités *variables* de représentation des interdépendances entre les termes de l'identité de Kaya. Nous avons esquissé une cartographie simplifiée des interdépendances entre indicateurs « à la Kaya » dans le Tableau 7. Le tableau doit se lire en ligne : la première ligne décrit les effets des dynamiques démographiques sur les autres termes de l'identité de Kaya, la deuxième l'influence de la croissance économique, et ainsi de suite…

Certaines des causalités citées dans ce tableau ont fait l'objet de recherches approfondies – comme l'effet de l'efficacité énergétique sur la croissance économique (1), ou encore les liens au sein du système énergétique entre le panier technologique et l'efficacité globale (2) – tandis que d'autres restent largement mal intégrées – comme c'est le cas des liens entre croissance et démographie (3).

	Démographie	**Croissance économique**	**Intensité énergétique du PIB**	**Intensité carbone de l'énergie primaire**
Démographie	X	Population active, ratio de dépendance, épargne	Préférences par génération, taille des ménages	Urbanisation, usage de biomasse traditionnelle
Croissance économique	Vitesse de la transition démographique, taux de fertilité, de mortalité (3)	X	Progrès technique, remplacement des installations, taux d'équipement	Progrès technique, Vitesse d'épuisement des ressources fossiles
Intensité énergétique du PIB		Facture énergétique, sensibilité aux chocs de prix (1)	X	Besoins en capacités, parts des potentiels ENR (2)
Intensité carbone de l'énergie primaire	Pollutions locales et santé	Déséquilibre extérieur, vulnérabilité géopolitique	Séquestration, rendement total (2)	X

Tableau 7 : Liens d'interdépendance entre les termes de l'identité de Kaya

Les six modèles[30] utilisés pour générer les scénarios SRES ont en commun une description détaillée du système énergétique, une description agrégée du reste de l'économie et un couplage avec des modules climatiques. Ils se distinguent principalement par leur mode de résolution (optimisation intertemporelle de la consommation agrégée, optimisation linéaire du système énergétique avec module macroéconomique, système dynamique en équilibre partiel des marchés énergétiques), leur description des changements d'usage des sols, ou encore leur module climatique. Ce n'est pas tant ici les détails de leur structure qui nous intéressent que le périmètre qu'ils recouvrent dans le Tableau 7. En fait les six modèles couvrent, avec plus ou moins de détails et de cohérence, les deux dernières colonnes du tableau, c'est-à-dire l'influence des hypothèses démographiques et macroéconomiques sur le système énergétique et les rétroactions internes au système énergétique. Au sein de ces colonnes, certaines dynamiques sont représentées de manière très agrégée et peu explicite, comme le changement structurel des économies, les dynamiques d'industrialisation ou de tertiarisation. Quant aux modules macroéconomiques (fonction de

[30] AIM, ASF, IMAGE, MARIA, MESSAGE, MiniCAM (Nakicenovic et *al.*, 2000, Annexe IV)

production, élasticité du PIB aux prix de l'énergie), ils sont trop agrégés pour permettre une représentation approfondie des rétroactions réciproques entre le système énergétique et le reste de l'économie, comme l'effet des déséquilibres issus des flux commerciaux d'énergie, l'effet d'une hausse des prix internationaux de l'énergie sur les prix relatifs domestiques, ou les dynamiques de relocalisation industrielle. Dès lors, par construction, cela fait un grand nombre de rétroactions dont la « cohérence » est en fait exprimée sous forme d'hypothèses numériques exogènes transcrivant les descriptions qualitatives des scénarios. C'est ce « défaut de construction » qui conduit évidemment à n'avoir pas suffisamment de garanties contre l'explosion combinatoire résultant de la juxtaposition de ces hypothèses. En d'autres termes, les modèles sont trop souples et insuffisamment discriminants vis-à-vis des jeux d'hypothèses testés.

L'histoire des débats autour des scénarios SRES nous fournit deux exemples de conséquences non négligeables de cet état de fait en termes de débat public.

Le premier exemple se rapporte à l'interprétation de Lomborg (2001) sur les scénarios SRES. En fait, il est courant d'affirmer que le taux de croissance du PIB dépend du progrès technique, lui-même déterminé, dans sa vitesse et sa direction, par le fonctionnement des régimes économiques internationaux et les modes de développement. Les « récits » formulés pour la production des scénarios SRES contiennent ainsi l'hypothèse qu'un style de vie plus « sobre » va de pair avec une croissance moins forte du PIB (scénario A1 – forte croissance, intensité carbone élevée – et B1 – croissance plus modérée et moins carbonée), ce que Lomborg (2001) ne manqua pas de noter pour en déduire une mesure des « coûts » de protection de l'environnement (Hourcade et Journé, 2002), concluant qu'une société écologique était décidément très coûteuse. Certes, on peut répondre que l'argument de Lomborg n'est pas très honnête dans la mesure où les auteurs eux-mêmes signalent bien qu'il n'y a aucune comparaison économique possible entre les « récits », et que les évaluations de coûts ne peuvent se faire qu'au sein d'un récit donné. Comme l'expliquent Hourcade et Journé (2002), des PIB plus ou moins élevés ne disent rien sur le niveau de « bonheur » atteint ; supposons par exemple une société dont les membres adopteraient des styles de vie de type franciscain, son PIB serait nettement plus faible qu'une société de cadres dynamiques conquérants. Mais il reste, et c'est la faiblesse du dispositif, qu'il n'y a aucune corrélation tant soit peu fondée entre un récit donné et les hypothèses numériques qui le traduisent. En prenant un autre exemple, nous pouvons imaginer qu'une société très fortement dématérialisée sera une société où les usages des métaux seront à très forte valeur ajoutée et où les services d'information domineront ; il n'y a pas de raison *a priori* que les flux de valeur au sein de cette économie, donc son PIB, soient *in fine* inférieurs à un scénario d'extrapolation des modes de développement actuels.

Le second exemple concerne la critique de Castles et Henderson (2003) sur l'usage de la mesure en parités de taux de change pour la modélisation des dynamiques de croissance. Cette critique consistait à souligner que la croissance des PED avait été surestimée dans les SRES du fait que le rattrapage des productivités ait été exprimé en taux de change courants (MER) plutôt qu'en parités de pouvoir d'achat (PPP). Cela conduit à surestimer l'écart de niveaux de vie entre les PED et les pays industrialisés et donc à surestimer la croissance future de la productivité des PED dans leur phase de convergence. En bout de chaîne, Castles et Henderson en déduisaient une surestimation certaine des émissions mécaniquement liées à la croissance des PED. Dans leur réponse, les auteurs du rapport SRES (Nakicenovic et *al.*, 2003) acceptent partiellement la critique mais soulignent qu'il n'est pas certain que les émissions aient été surévaluées. En effet, l'erreur faite sur la croissance est

partiellement compensée par l'erreur symétrique sur le coefficient autonome de découplage énergie-croissance (AAEE). Seul un modèle désagrégé et intégrant un progrès technique endogène peut permettre de tester cette affirmation numériquement. McKibbin et *al.* (2004) procèdent à cette vérification avec le modèle *G-Cubed*, en concluant que l'erreur de « mesure » du rattrapage de productivité potentiel par les PED a un effet incertain sur les émissions, selon le contenu de leur croissance et l'affectation des investissements. En fait, ce qui est en jeu ici est bien la cohérence entre les flux et les stocks matériels et les flux en valeur enregistrés par les comptabilités nationales, avec, comme sous dossier important, la question de l'évaluation de l'ampleur des économies informelles.

Ces deux exemples soulignent l'impératif de renforcement de la cohérence des scénarios. L'enjeu scientifique est double : d'une part, progresser dans l'observation et la compréhension des interrelations entre les *déterminants fondamentaux* des émissions ; d'autre part recourir à des modèles les plus « complets » possibles en termes de périmètre et de représentation de ces interrelations à la fois en prix et en quantité. Il est certain que les modélisateurs ont considérablement progressé sur ce deuxième axe de recherche, notamment avec les nombreux développements de modèles hybrides, et il est remarquable que les dernières recommandations du Groupe de Travail sur les Nouveaux Scénarios d'Émissions (GIEC, 2007) insistent sur cet impératif de renforcement de cohérence au sein des scénarios et entre les modèles utilisés.

2 Quel contenu matériel de la croissance dans un scénario « central » ?

Nous avons présenté dans les chapitres 2 et 3 les principales hypothèses retenues pour notre scénario central. Nous allons en exposer le contenu en prêtant attention principalement aux interactions entre déterminants macro-économiques et déterminants techniques de ce scénario. Nous commençons par une présentation agrégée de la croissance économique dont nous préciserons dans un second temps, le contenu matériel.

2.1 Une vision agrégée de la richesse mondiale

Les croissances du PIB des différentes régions sont présentées dans la Figure 30, et la Figure 31 donne les taux de croissance annuels correspondants. Pour s'en tenir à ce seul exemple, nous pouvons observer que le PIB chinois qui vaut en début de période 13.1% du PIB des Etats-Unis représente en 2100 52.1% du PIB des Etats-Unis. Toutefois, pour donner une meilleure représentation de la taille « réelle » des économies sous-jacentes, il faut en même temps tenir compte de l'évolution des richesses en parité de pouvoir d'achat. Avec cette mesure, la Chine représente en 2100 211.6% de la richesse matérielle des USA contre 53.3% en 2001. Par tête, ce rattrapage est très significatif mais l'écart entre le standard de vie des citoyens américains et chinois reste important dans ce scénario de référence.

A un niveau agrégé, la valeur monétaire de la richesse mondiale exprimée en dollars 2001 est multipliée par 8.31 entre 2001 et 2100 avec un PIB passant de 30100 à 257539 milliards de dollars (taux de croissance annuel moyen (t.c.a.m.) de 2.16%). Le revenu moyen *per capita* est quant à lui

multiplié par 4.94, passant de 5070 $ en 2001 à 25050 $ en 2100. Replacée dans le paysage des scénarios SRES, notre trajectoire de référence se situe du point de vue de la croissance économique dans une position plutôt basse étant donné que le t.c.a.m. le plus faible pour le PIB mondial vaut 2.2% et se retrouve dans le scénario B2. En termes de richesse *per capita*, notre scénario se retrouve en 2100 proche du scénario B2 (22600 $/habitant), un peu au dessus du scénario A2 (16100 $/ habitant) mais loin derrière le scénario A1 (74900 $/ habitant). La spécificité de cette évolution agrégée est explicable par un nombre limité de paramètres. Le niveau de la croissance du PIB est théoriquement lié simultanément à la croissance de la population active et à la croissance de la productivité générale des facteurs. Le traitement de ce dernier paramètre est ici central, puisqu'il renvoie à un débat important sur la convergence des richesses par habitant. La littérature empirique ne permet pas en effet de départager le débat entre (i) une convergence des niveaux absolus des productivités et des richesses et (ii) une convergence en taux de croissance de ces deux paramètres. Lors des scénarios SRES, c'est principalement le premier type de convergence qui a été largement exploré, mais le débat central sur les facteurs conduisant à l'un ou l'autre type convergence a été largement éludé en particulier en raison de la force des controverses PPP *versus* MER. Comme nous l'avons vu, ce dernier débat est en quelque sorte dépassé dans la structure d'IMACLIM-R en raison de la représentation duale quasi systématique en quantité et en prix. Il nous restait donc à régler la question du rattrapage. Nous l'avons fait par le recours à un traitement qui permet, en jouant sur un paramètre simple, de représenter des trajectoires où, à partir d'un certain moment, la convergence en valeur absolue laisse place à une convergence en taux (étant bien entendu que ce moment peut être celui de l'égalité des valeurs absolues, voire un scénario où la région retardataire devient à son tour région leader). La solution fut de modéliser des phases rattrapage, entre les régions, de la productivité du travail calibrées sur les tendances passées, en les faisant tendre, de façon plus ou moins rapide vers un même taux de 1,65 % par an. C'est en définitive la longueur de cette convergence des productivités vers ce taux de 1,65 % par an qui détermine l'ampleur du rattrapage en valeur absolue (voir chapitre 2). De plus, ces gains de productivité du travail ne sont qu'au fondement de la croissance potentielle d'une économie et représentent des potentiels réels de rattrapages technologiques ou organisationnels. La croissance effectivement obtenue *ex-post* dépendra du contexte économique dans lequel se déploient les potentiels de croissance.
Nous pouvons donc, sur cette base, comprendre pourquoi notre scénario de référence traduit une croissance économique globalement plus faible que dans la plupart des scénarios SRES.

Une première source de différence réside dans les choix paramétriques concernant les dynamiques démographiques et les durées de rattrapage des écarts de productivité du travail. Passons rapidement sur les régions de l'OCDE : celles-ci se maintiennent en tête de la richesse mondiale par habitant et leur croissance est soutenue par des gains de productivité égaux sur le long terme à 1.65 % par an. Ce taux de long terme a l'avantage d'être cohérent avec l'expérience des deux derniers siècles et fournit un point d'appui finalement assez robuste. Moins solidement étayées, sont évidemment les hypothèses sur les durées des phases de rattrapage pour les autres régions. Nous aurions pu légitimement les choisir de façon assez libre, mais nous avons finalement préféré calibrer le modèle sur des données historiques et cela revenait *de facto* à réduire le potentiel de rattrapage effectif en termes de richesse par habitant.

Une deuxième source de différence est tout simplement due à un phénomène physique, celui de la période de transition énergétique liée au phénomène de déplétion qui pèse sur la production de pétrole. C'est essentiellement ce facteur qui explique pourquoi les taux de croissance régionaux du

PIB décrits connaissent tous une discontinuité sur la période 2028-2051. Le lecteur pourra se reporter à la section 3 pour une description détaillée de la projection du secteur énergétique. Le profil de la discontinuité est opposé selon que les régions sont importatrices ou exportatrices d'hydrocarbures. Ainsi le Moyen-Orient, la CEI, l'Amérique Latine hors Brésil et le Canada connaissent une accélération de leur croissance sur cette période alors que les autres régions font plutôt face à un ralentissement. Dans un monde fortement contraint par la mise à disposition des ressources pétrolières, les potentiels de croissance régionaux sont logiquement limités dans leur réalisation.

En fin de compte, la Chine et l'Inde sont les régions les plus dynamiques en début de période (2001-2030), avec un taux de croissance annuel moyen du PIB de 6.4% pour la Chine et de 6.5% pour l'Inde et avec des taux de croissance annuels qui peuvent être au dessus de 7%. Cette croissance est fortement ralentie au-delà de 2030, du fait de l'essoufflement des deux moteurs de la croissance que sont les gains de productivité et la croissance démographique. A ce ralentissement s'ajoutent, en particulier en Chine, des contraintes de financement liées à la baisse du taux d'épargne des ménages induite par le vieillissement de la population. La CEI connaît sensiblement le même profil de croissance, avec des marges de gains de productivité élevées, et malgré l'absence de dynamisme démographique. Le reste des pays en développement connaissent des taux de croissance supérieurs à ceux de l'OCDE, avec un rattrapage de productivité un peu plus échelonné dans le temps que pour la Chine et l'Inde, mais avec une croissance démographique soutenue.

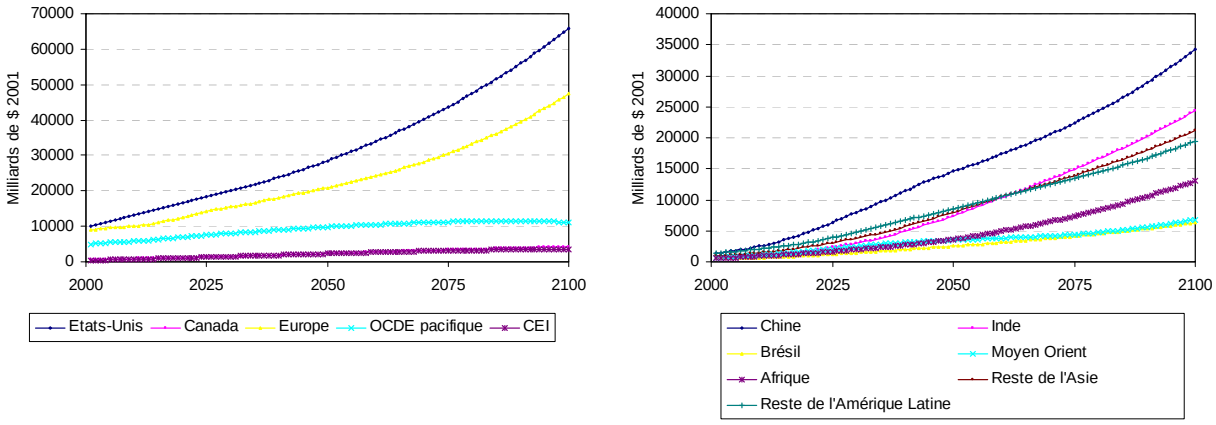


Figure 30 : Evolution des PIB régionaux (Parité de taux de change), scénario de référence

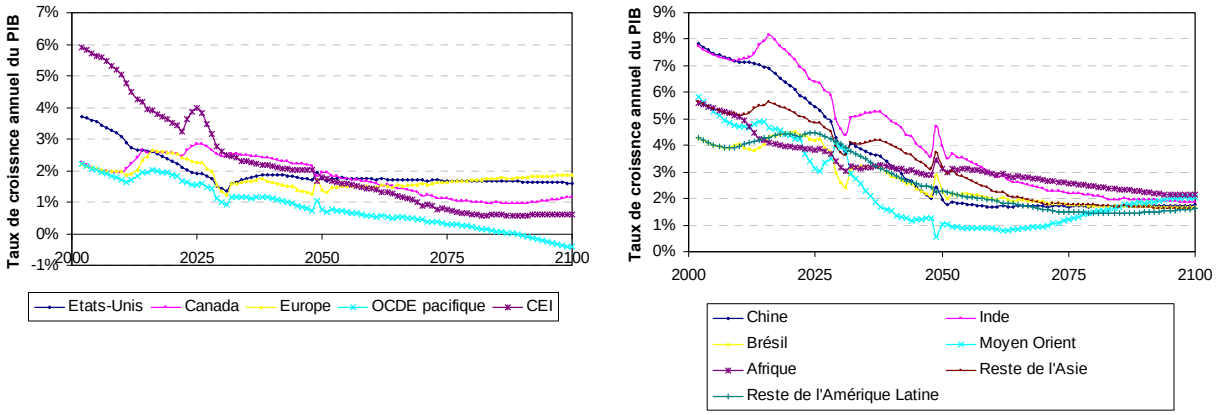


Figure 31 : Taux de croissance des PIB régionaux

Les hypothèses présentées dans le chapitre 2 (section 3.6) sur le fonctionnement des marchés internationaux conduisent sans surprise à une augmentation continue des échanges entre régions. Le commerce international croît, à un taux plus élevé que le PIB mondial sur la période 2001-2030 (taux moyen de 3.79% par an contre 2.94% par an pour le PIB) puis ralentit à un taux de croissance moyen de 1.26% sur la période 2030-2100. Ainsi, au cours de ce scénario, le phénomène de mondialisation s'accroît en début de période pour ralentir ensuite. Ce ralentissement reflète un redéploiement progressif de la croissance vers les marchés intérieurs dans les grands pays en développement dont la croissance repose de plus en plus sur la demande finale de leurs ménages. Dans ce contexte, le volume mondial du commerce d'énergie est en très forte progression en début de période (t.c.a.m de 5.67% entre 2001-2030) sous l'effet conjugué de la croissance soutenue de la consommation mondiale d'énergie et de la hausse substantielle des prix. Le taux de croissance du volume mondial du commerce d'énergie ralentit ensuite du fait de la stabilisation des prix du pétrole et de l'évolution du système de production de carburants liquides vers l'utilisation du charbon dont les grandes régions du modèle possèdent d'importantes réserves domestiques (Etats-Unis, Chine, Inde…).

La contribution des différentes régions au volume des exportations mondiales évolue substantiellement au cours de la trajectoire. L'Annexe 1 perd ainsi progressivement des parts de marché sur la période 2001-2050 sous la pression des pays émergents et de la croissance de la valeur du commerce de pétrole dont bénéficie principalement la région du Moyen-Orient. Le phénomène s'inverse ensuite quand le commerce du pétrole perd peu à peu de son importance sous l'effet de la déplétion et que les pays émergents réorientent leur croissance vers leur marché intérieur, rééquilibrant ainsi leur balance commerciale.

	2001	2030	2050	2100
Annexe 1	61,6%	53,2%	51,9%	53,6%
Non Annexe 1 hors Moyen Orient	33,2%	37,6%	41,0%	42,4%
Moyen Orient	5,2%	9,3%	7,1%	4,0%

Tableau 8 : Parts des régions dans les exportations mondiales

2.2 Une traduction en termes de contenu matériel et de changement structurel

Si l'analyse d'un scénario de croissance en termes monétaire permet de saisir l'évolution de la richesse des régions étudiées et de leurs capacités de financement, le contenu en carbone de la trajectoire dépendra *in fine* de son contenu énergétique. Il est indéniable que le lien entre la croissance et la consommation d'énergie puis entre la consommation d'énergie et les émissions de CO_2 dépend d'abord des technologies utilisées pour satisfaire le vecteur des services énergétiques avec des énergies finales, puis du système de transformation énergétique permettant de convertir les énergies primaires en énergies finales. Mais la dynamique même d'évolution de la demande de services énergétiques reste un élément déterminant dans le niveau final des émissions. Pour une économie donnée, l'évolution de ce vecteur dépend des interactions entre les modes de consommation, les choix technologiques et les décisions de localisation des différents agents. Elle est la traduction du changement de structure et de contenu matériel de la croissance économique. La composition structurelle et le contenu matériel d'une trajectoire de croissance économique se révèlent en pratique tant par le poids des différents secteurs productifs dans la composition du PIB que par l'évolution de la structure de la demande des ménages et de leurs stocks d'équipements qui sont déterminants pour la consommation d'énergie tels que les véhicules automobiles ou la surface de logement résidentiel.

Composition du PIB

L'évolution de la structure du PIB d'une région dépend simultanément de plusieurs facteurs : l'évolution des prix relatifs, la structure de la demande finale et des consommations intermédiaires, le positionnement vis-à-vis du commerce international. Il existe en réalité une course de vitesse entre l'évolution de la consommation des ménages qui détermine le montant de la demande en quantité, et les gains de productivité dans les secteurs qui conditionnent l'évolution des prix de production. Un secteur qui bénéficie d'importants gains de productivité et dont la demande qui lui est adressé connaît un phénomène de saturation verra ainsi sa contribution au PIB diminuer au cours d'une simulation. Dans un modèle tel qu'IMACLIM-R, les possibilités d'échanges commerciaux entre régions compliquent encore le problème dans la mesure où un secteur productif d'une région peut répondre à l'augmentation de la demande finale des ménages d'une autre *via* le commerce international. Les résultats obtenus doivent donc être analysés en tenant compte des interactions entre ces dynamiques, chacune dépendant des paramétrages effectués lors du calibrage du modèle

(degré de spécialisation des régions pour la production, structure de la demande finale des ménages, contribution au commerce mondial…).

Au cours de la trajectoire de référence, la composition du PIB change, sans surprise, assez significativement comme l'illustre le Tableau 9. L'ensemble des régions connaît une tertiarisation de l'économie tout au long de la trajectoire. Dans les régions de l'OCDE, cette dématérialisation se réalise principalement aux dépens du secteur industriel tandis que la part du secteur agricole dans le PIB, qui est déjà réduite en début de période, ne décroît que faiblement. Cette quasi-stabilité s'explique par une évolution limitée du cœfficient budgétaire des ménages associé à la consommation de biens agroalimentaires. L'ensemble des PED et la CEI voient aussi la part des services augmenter fortement dans la composition de leur PIB, ils restent cependant, en fin de période, en deçà du niveau de dématérialisation des économies de l'OCDE en 2001. Cet accroissement de la part des services s'effectue différemment en fonction des régions aux dépens des secteurs agricoles ou industriels.

		2001	2050	2100
Etats-Unis	Agriculture	4%	4%	3%
	Industrie	29%	25%	22%
	Services	68%	71%	75%
Canada	Agriculture	6%	4%	4%
	Industrie	42%	39%	31%
	Services	53%	57%	64%
Europe	Agriculture	6%	6%	5%
	Industrie	33%	29%	26%
	Services	61%	65%	69%
OCDE pacifique	Agriculture	5%	4%	4%
	Industrie	34%	29%	25%
	Services	61%	67%	71%
CEI	Agriculture	15%	13%	13%
	Industrie	55%	50%	42%
	Services	30%	37%	46%
Chine	Agriculture	21%	17%	15%
	Industrie	57%	52%	42%
	Services	22%	32%	42%
Inde	Agriculture	27%	16%	12%
	Industrie	36%	35%	32%
	Services	37%	50%	56%
Brésil	Agriculture	9%	9%	7%
	Industrie	34%	36%	32%
	Services	57%	55%	61%
Moyen Orient	Agriculture	9%	7%	8%
	Industrie	47%	49%	35%
	Services	44%	44%	57%
Afrique	Agriculture	23%	20%	15%
	Industrie	40%	42%	39%
	Services	37%	38%	46%
Reste de l'Asie	Agriculture	13%	10%	8%
	Industrie	40%	37%	33%
	Services	46%	53%	60%
Reste de l'Amérique Latine	Agriculture	14%	10%	9%
	Industrie	39%	39%	34%
	Services	47%	50%	57%

Tableau 9 : PIB, composition par secteur

Modes de consommation des ménages

Nous avons choisi pour le scénario de référence une hypothèse de style de développement dit mimétique qui se traduit pour les ménages par des choix d'équipement et de consommation qui visent à imiter et poursuivre le modèle de développement occidental. De même, les politiques de

développement des infrastructures de transports suivent l'évolution de la demande de mobilité et s'orientent fortement vers les modes routiers et aériens.

Concernant la structure de la consommation des ménages pour les biens finaux, nous ne nous attarderons pas sur notre hypothèse de saturation à un niveau certes élevé, dans ce scénario mimétique, de la consommation de biens industriels manufacturés. L'évolution de la structure du PIB que nous obtenons traduit cette saturation, de même d'ailleurs que la saturation de la consommation par tête de biens agroalimentaires, et tout se joue ici sur le niveau des asymptotes choisies. Un mode de développement plus « frugal » se traduirait simplement par des asymptotes plus basses et par un taux d'obsolescence plus lent des équipements.

Nous entrerons ici sur les rôles de la mobilité et de l'équipement résidentiel qui, outre qu'ils représentent une part centrale du problème à résoudre, sont fondés sur des dynamiques dont la représentation est plus complexe que la simple marche plus ou moins rapide vers une asymptote plus ou moins élevée. Pour la mobilité en particulier se pose la question même de l'idée de saturation.

La première conséquence déterminante du choix d'un style de développement mimétique concerne l'évolution de la mobilité motorisée. Au cours de la trajectoire de référence, le volume mondial de mobilité motorisée (mesurée en passager.km) est multiplié par 8.7 mais ce nombre est ramené à 5.2 lorsque l'on considère la mobilité par habitant. Le Tableau 10 et la Figure 32 révèlent une disparité importante entre les régions due à des dynamiques sous jacentes différentes :

- Les pays de l'OCDE ne connaissent pas de véritable saturation du besoin de mobilité. Avec un mode de développement qui favorise l'étalement urbain et la construction d'infrastructures routières, le transport automobile est privilégié pour les trajets à courte et moyenne distance. La mobilité à longue distance avec le mode aérien connaît une forte croissance qui mène la part modale des véhicules particuliers à décliner. Dans ce contexte, le développement des transports publics reste limité à des marchés de niche et sa part modale décroît sensiblement
- Les pays émergents connaissent une démocratisation de l'accès à la mobilité motorisée. Ce phénomène s'effectue dans un premier temps grâce à une augmentation de l'utilisation des transports en commun qui est concomitante avec la mise en place d'un système de transport fondé sur l'automobile de masse. Avec l'augmentation des revenus, les réseaux de transport en commun, essentiellement routiers, cèdent la place à l'automobile. En fin de période, les revenus continuant d'augmenter, ces régions connaissent un début de démocratisation de la mobilité aérienne à longue distance.

	Evolution de la mobilité (période 2001-2100)	**Evolution du PIB nominal (période 2001-2100)**	**Elasticité révélée**
OCDE	+ 218%	+ 420%	0,52
CEI	+ 554%	+ 774%	0,72
PED	+ 1972%	+ 2046%	0,96
Monde	+ 767%	+ 731%	1,05

Tableau 10 : Croissance de la mobilité motorisée

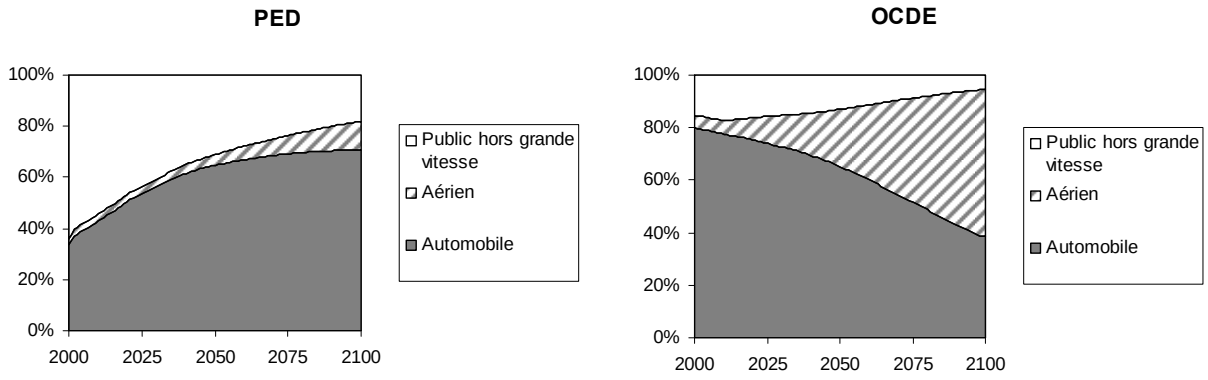


Figure 32 : Partage modal, sélection de régions

En plus d'un développement suffisant des infrastructures nécessaires, la démocratisation de la mobilité automobile repose sur l'équipement des ménages en véhicules particuliers. Le taux d'équipement continue à croître dans toutes les régions, à l'exception des USA déjà proches de la saturation. Pour les pays émergents ou en développement, l'expansion du parc de véhicules est particulièrement importante témoignant des choix que font les ménages de ces pays en l'absence d'une contrainte véritable du trafic automobile (Tableau 11). Le taux de motorisation moyen mondial passe ainsi de 106 véhicules pour mille habitants en 2002 à 487 en 2100 et augmente dans toutes les régions du globe. En 2050, les taux d'équipement sont compris entre 100 et 350 véhicules pour mille habitants dans toutes les régions en développement sauf l'Amérique Latine (388 pour mille) qui a déjà aujourd'hui un taux de motorisation plus élevé que les autres régions de ce groupe. Toujours à la même date, ce taux est de l'ordre de 550 véhicules pour mille habitants dans les pays industrialisés, sauf pour les pays d'Amérique du Nord qui sont proches de leur niveau de saturation à 700 véhicules pour mille habitants. Les écarts d'équipement continuent de diminuer tout au long de la projection pour obtenir une distribution mondiale des véhicules assez uniforme en 2100, l'Afrique restant encore en retrait (Figure 33). Le parc mondial d'automobiles passe de 659 millions de véhicules en 2002 à 2.71 milliards en 2050 et à 5 milliards en 2100. Mais en 2050, la structure de ce parc est déjà profondément bouleversée : les pays de l'Annexe 1 ne comptent plus que pour 31 % du parc mondial de véhicules, contre 82 % en 2002. En 2100, cette proportion atteint 18% pour l'Annexe 1, ce qui correspond à une inversion de la situation de 2002.

	2002	2030	2050	2100
OCDE Amérique du Nord	677	688	693	699
Europe élargie	372	503	569	665
OCDE Pacifique	369	490	549	658
CEI	101	401	508	614
Chine	14	187	347	551
Inde	11	87	254	533
Reste de l'Asie émergente	22	99	244	515
Amérique latine	82	258	388	565
Afrique et Moyen Orient	27	68	103	323
Monde	106	195	291	487

Tableau 11 : Equipement des ménages en véhicules particuliers (véhicules pour 1000 habitants)

Ces résultats peuvent paraître en contradiction avec un prix du pétrole qui augmente fortement, passant de 25$ le baril en 2001 à un niveau proche de 100$ quand les contraintes de déplétion commencent à peser sur les capacités de production du Moyen-Orient (voir section 3 pour plus de détails). En fait, cette comparaison si fréquente entre le prix présent et le prix futur du baril introduit un effet d'optique pour trois raisons. La première est que l'impact du prix du pétrole sur les prix de l'essence est considérablement amorti par la fiscalité ; dans le contexte fiscal européen par exemple, un doublement hypothétique du prix du pétrole de 60 $/bl. à 120 $/bl. n'entraîne qu'une augmentation de 34 % du prix de l'essence, de 1.28 à 1.71 €/l. La deuxième tient au fait que le progrès technique effectué sur les véhicules amortit encore l'impact de la hausse des prix de l'énergie primaire sur le prix final du service. La troisième revient simplement au constat qu'il faut toujours comparer cette hausse des prix de l'énergie à celle du pouvoir d'achat des ménages qui croit significativement dans notre scénario.

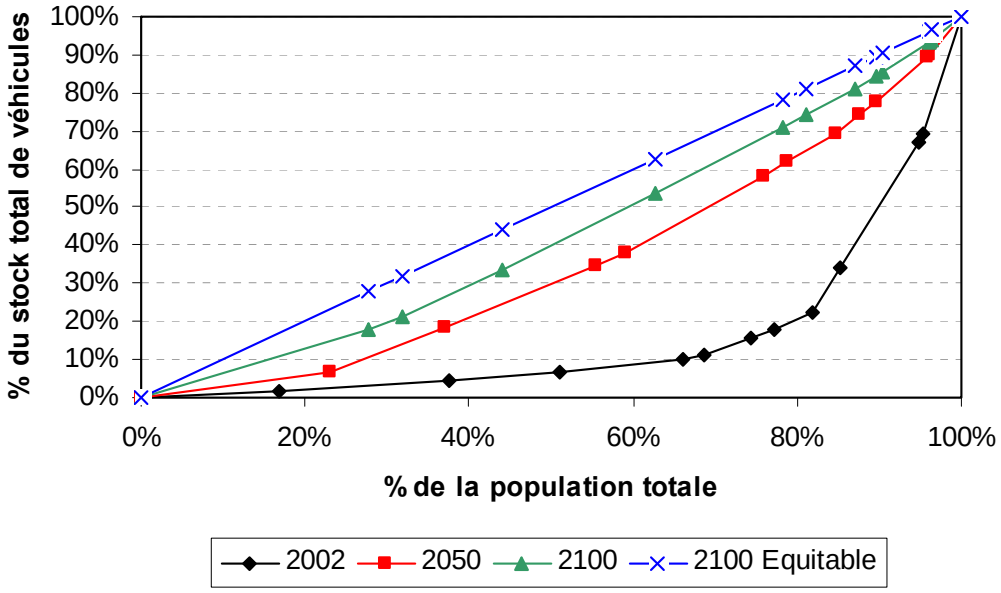


Figure 33 : Courbe de Lorenz du stock de véhicules particuliers

Nous avons souligné précédemment qu'un tel développement de la mobilité automobile ne pouvait s'opérer qu'au prix d'une politique d'infrastructure de transport qui soit fortement orientée vers le mode routier. En fait, compte tenu des préférences des ménages prises en compte dans ce scénario mimétique, la seule contrainte au développement de la mobilité automobile pourrait être une politique d'infrastructures de transport qui, pour des raisons de qualité de l'environnement local, de sécurité énergétique ou de politique urbaine, limiterait le déploiement des infrastructures routières. Or, dans ce scénario, ces infrastructures s'adaptent à la demande en prenant cependant en compte les contraintes de financement. Une des conséquences directes de l'hypothèse mimétique pour les styles de développement et de cette absence de contraintes sur les infrastructures routières est l'accélération de l'étalement urbain. L'ampleur de ce phénomène dépend toutefois des spécificités régionales ; il est ainsi beaucoup plus prononcé en Amérique du Nord que dans les autres régions du monde. Cette tendance se traduit, dans toutes les régions, à la fois par une consommation importante de transport automobile et par une augmentation des surfaces résidentielles par habitant (Tableau 12). Les surfaces de logement par habitant croissent ainsi dans toutes les régions du monde. Cette croissance est modérée mais significative dans les pays de l'OCDE dont les niveaux de départ sont déjà élevés : parmi ces pays, on différencie nettement le mode de développement de l'Amérique du Nord avec des niveaux approchant 100 m^2 par habitant et celui de l'Europe, du Japon et de la CEI, où les surfaces par habitant sont deux fois moins élevées en 2100. Du côté des PED, une croissance plus forte s'applique à des niveaux de départ plus faibles et il s'opère un quasi-rattrapage des régions de l'Annexe 1 hors Amérique du Nord à l'horizon 2100. Il faut noter ici que le doublement de la surface résidentielle *per capita* sur la période 2000-2100 à l'échelle mondiale aura un impact important sur l'évolution de la demande énergétique des ménages dans la mesure où cette croissance, concomitante à une forte augmentation des revenus, est l'un des principaux déterminants de la demande de nombreux services énergétiques résidentiels tels que le chauffage, la climatisation ou l'équipement en électroménager.

	2001	**2030**	**2050**	**2100**
OCDE Amérique du Nord	59	64	75	99
Annexe1 hors OCDE Amérique du Nord	30	37	41	49
Chine	20	22	25	39
Inde	7	12	18	40
Reste du monde	14	19	24	35
Monde	19	22	27	40

Tableau 12 : Surface de logement (m^2 par habitant)

Conclusion partielle

Le point important ici est de remarquer, ce qui est d'ailleurs cohérent avec une hypothèse de croissance économique modérée par rapport à l'éventail des scénarios SRES, que, si la richesse matérielle du monde s'accroît, elle ne le fait pas de façon exponentielle. Après tout, un doublement de la surface résidentielle par tête à l'échelle du siècle correspond à une amélioration fort modeste du confort moyen et un triplement de cette surface n'aurait pas été *a priori* déraisonnable. La croissance de la mobilité automobile est certes plus impressionnante, mais après tout, elle traduit simplement le fait que, à la fin du siècle, les pays en développement auront un standard de vie un

peu supérieur à celui de l'OCDE hors Amérique du Nord aujourd'hui. Quand nous discuterons des conséquences en termes d'émissions de gaz à effet de serre, il faudra donc se rappeler qu'elles sont sous-tendues par une vision du contenu matériel du développement, à la fin du siècle, que d'aucuns pourront trouver trop conservatrice parce qu'impliquant la permanence de poches importantes de pauvreté matérielle et un rattrapage de richesse encore incomplet.

3 Consommation d'énergie et prix relatifs

Le contenu macroéconomique et matériel de la trajectoire décrit en section 2 et résumé dans le Tableau 13 conduit à une multiplication par 4.4 de la consommation finale d'énergie sur la période 2001-2100. Comparée à une multiplication simultanée de la richesse par 8.3 sur la même période, ces résultats révèlent une élasticité implicite de la consommation finale d'énergie au PIB proche de 0.46 qui peut être finalement considérée comme basse à la vue des observations historiques. Ce découplage partiel de la consommation finale d'énergie et de la croissance économique est simultanément dû à :

- des gains d'efficacité énergétiques autonomes,
- un changement structurel de l'activité vers des secteurs productifs moins intensifs en énergie,
- l'évolution des prix relatifs des énergies qui induisent des changements techniques.

Dans un modèle tel qu'IMACLIM-R, les résultats obtenus procèdent de l'interaction endogène de ces trois éléments. Conscients de la difficulté de présenter des résultats aux dynamiques intrinsèquement liées, nous mènerons dans ce qui suit une rédaction linéaire en commençant par décrire l'évolution de la demande finale d'énergie puis les trajectoires de prix des énergies et enfin l'évolution du système de transformation énergétique.

	2001-2030	2030-2050	2050-2100	2001-2100
PIB Monde	+ 132%	+ 56%	+ 130%	+ 731%
Demande finale d'énergie Monde	+ 103%	+ 31%	+ 65%	+ 339%
Surface résidentielle Monde	+ 58%	+ 34%	+ 65%	+ 250%
Passagers.kilomètres motorisés Monde	+ 197%	+ 58%	+ 85%	+ 767%
Stock de véhicules particuliers Monde	+ 147%	+ 67%	+ 84%	+ 659%

Tableau 13 : Croissance mondiale, sélection d'indicateurs et sélection de périodes

3.1 La structure de la demande finale change au cours du temps

Le détail sectoriel de l'évolution de la consommation finale d'énergie à l'échelle mondiale (Figure 34) révèle un changement important de sa structure avec le secteur des transports qui devient le secteur dominant alors que la part des secteurs industriels et agricoles passe de 42% en 2001 à 36% en 2100 au niveau mondial. Cette croissance modérée de la consommation d'énergie du secteur industriel s'explique simultanément par des gains substantiels d'efficacité énergétique et par une tertiarisation de l'économie.

La croissance de la consommation énergétique du secteur agricole reste soutenue du fait de la mise en place de filières de production de biocarburants à grande échelle (se reporter à la sous-section

suivante pour plus de détails) et du dynamisme de la demande des secteurs agricoles des régions émergentes (Tableau 14) qui connaissent simultanément une mécanisation et une augmentation de la demande liée à l'évolution des besoins alimentaires de leurs populations. Partant cependant d'un niveau absolu initial relativement faible, la demande d'énergie provenant du secteur agricole reste peu importante sur l'ensemble de la trajectoire.

Par rapport aux autres secteurs productifs, le secteur des services connaît la croissance de la consommation d'énergie la plus importante. La tertiarisation des activités économiques ajoutée aux augmentations des besoins de climatisation et des puissances unitaires des équipements sont à l'origine de cette croissance dynamique qui conduit la part du secteur des services dans la demande finale d'énergie au niveau mondial de 10% en 2001 à 16% en 2100.

Même si sa part est déclinante à l'échelle mondiale (de 17% en 2001 à 13% en 2100), l'évolution de la demande énergétique du secteur résidentiel reste centrale dans la mesure où, avec le secteur des services, elle devient le principal déterminant de l'évolution de la demande d'énergie électrique.

Entre 2001 et 2100, le secteur des transports est responsable à lui seul de 37% de l'augmentation de la demande finale d'énergie. Ce résultat est la conséquence directe de l'hypothèse de styles de développements mimétiques décrits en section 2. La mobilité individuelle augmente dans toutes les régions et le partage modal évolue vers des modes plus rapides et plus intensifs en énergie. L'activité du transport de marchandise ne connaît pas, conformément aux tendances récentes, de réel découplage de la croissance économique, conséquence de la continuation du processus de mondialisation, de la dispersion des moyens de production et du développement d'une organisation logistique fondée sur le « juste à temps ».

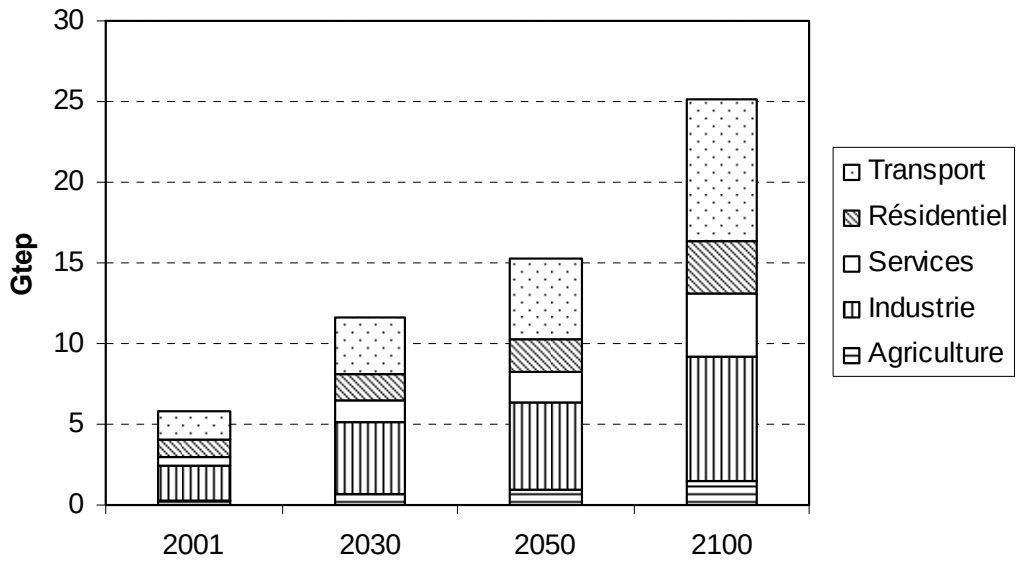


Figure 34 : Evolution de la consommation finale d'énergie (hors biomasse traditionnelle) par secteur à l'échelle mondiale (Gtep)

		2001	2030	2050	2100	t.c.a.m. 2001-2030	t.c.a.m. 2030-2050	t.c.a.m. 2050-2100
Agriculture	**Annexe1**	175	300	364	539	1,87%	0,97%	0,79%
	Non Annexe 1	140	438	648	997	4,01%	1,97%	0,87%
Industries	**Annexe1**	1262	1921	1944	2541	1,46%	0,06%	0,54%
	Non Annexe 1	852	2446	3336	5125	3,70%	1,57%	0,86%
Services	**Annexe1**	458	872	1141	2114	2,24%	1,36%	1,24%
	Non Annexe 1	122	479	845	1813	4,82%	2,88%	1,54%
Transports	**Annexe1**	1254	1776	1959	3067	1,21%	0,49%	0,90%
	Non Annexe 1	489	1830	3015	5800	4,66%	2,53%	1,32%
Résidentiel	**Annexe1**	732	924	999	1172	0,80%	0,39%	0,32%
	Non Annexe 1	258	696	1020	2027	3,48%	1,93%	1,38%
Total	**Annexe1**	3882	5792	6407	9431	1,39%	0,51%	0,78%
	Non Annexe 1	1861	5889	8864	15762	4,05%	2,07%	1,16%

Tableau 14 : Consommation finale d'énergie (hors biomasse traditionnelle) par secteur (Mtep), détail régional

L'analyse rapide qui vient d'être menée permet d'isoler quatre points clés qui vont gouverner l'évolution du système énergétique mondial et les changements techniques et structurels qui s'y réfèrent :

- Des styles de développement et des préférences individuelles fortement orientés vers la consommation de transport génèrent à court et moyen terme une croissance remarquable de la consommation de carburants liquides qui sont aujourd'hui produits grâce au raffinage du pétrole brut. Cette filière technologique se heurte à moyen terme à des contraintes de déplétion qui s'appliquent sur la production de pétrole conventionnel. L'enjeu sous-jacent revient à déterminer la forme et le coût du système technique, tant du côté de l'offre que du côté de la demande, qui pourra soutenir le développement d'une trajectoire intensive en transport.
- La croissance de la consommation d'énergie des secteurs résidentiels et tertiaires est soutenue tout au long de la trajectoire, mais est particulièrement vigoureuse dans les pays émergents sur la période 2001-2030 qui connaissent à ce moment une phase de rattrapage intense et donc une forte augmentation des revenus. L'évolution de la demande d'énergie issue de ces deux secteurs est un des principaux déterminants de la croissance de la production électrique. Le secteur de la production d'électricité, en particulier dans les économies émergentes, se trouve donc face au défi de mettre en place les infrastructures nécessaires pour répondre à cette augmentation de demande. Le changement technique dans les technologies de production électrique sera donc particulièrement influencé par les caractéristiques des systèmes électriques des économies émergentes.
- La répartition régionale de la consommation finale d'énergie change radicalement au cours de la période considérée. La part des régions de l'Annexe 1 dans le total de la consommation finale d'énergie passe de 68% en 2001 à 37% en 2100. Cette modification

s'explique par le phénomène de rattrapage qui s'applique aux économies émergentes qui ont de surcroît une croissance démographique plus vigoureuse.

- La croissance de la consommation finale d'énergie dans l'Annexe 1 connaît un ralentissement sur la période 2030-2050 puis elle ré-accélère modérément sur la période 2050-2100. Ce phénomène est lié à la saturation des potentiels d'efficacité énergétique dans certains secteurs à un moment où les prix de l'énergie connaissent une stagnation et les revenus une augmentation continue.

Au final, il est utile de remarquer que : concernant le phénomène de saturation du progrès technique pour l'efficacité énergétique dans l'Annexe 1, ou concernant encore les différences de dynamique dans les pays en développement, nous faisons apparaître dans notre scénario de référence, des évolutions qui ne seraient pas matérialisées avec une représentation exogène des évolutions technologiques.

3.2 Contraintes sur la mise à disposition des ressources pétrolières, de leurs substituts et prix des énergies fossiles

Dans cette trajectoire de référence, les prix augmentent significativement pour les trois énergies fossiles primaires (Figure 35). Cette augmentation des prix des énergies qui se fixent (comme tous les autres prix) comme des prix de marché, reflète les tensions entre l'évolution de l'offre et de la demande, et traduit ainsi que la demande croît plus vite que l'offre. Un prix élevé pour une énergie finale donnée induit une modification des choix technologiques des agents économiques vers des technologies plus efficaces ou qui utilisent d'autres sources d'énergies moins chères. Lorsque l'on est dans le cadre d'une modélisation endogène du progrès technique (ce qui est le cas dans cette trajectoire de référence), le changement des prix relatifs des énergies induit en plus une modification à la baisse du coût en capital des différentes technologies disponibles dans le portfolio de chaque agent *via* les courbes d'apprentissage[31].

[31] On notera simplement qu'il peut y avoir, dans bien des cas, des raisons à la croissance du coût en capital comme, par exemple, l'augmentation du niveau de précaution en matière d'environnement local ou tout simplement des difficultés de résolution de tel ou tel problème technique. Au total cependant, c'est bien l'effet des courbes d'apprentissage qui sera dominant.

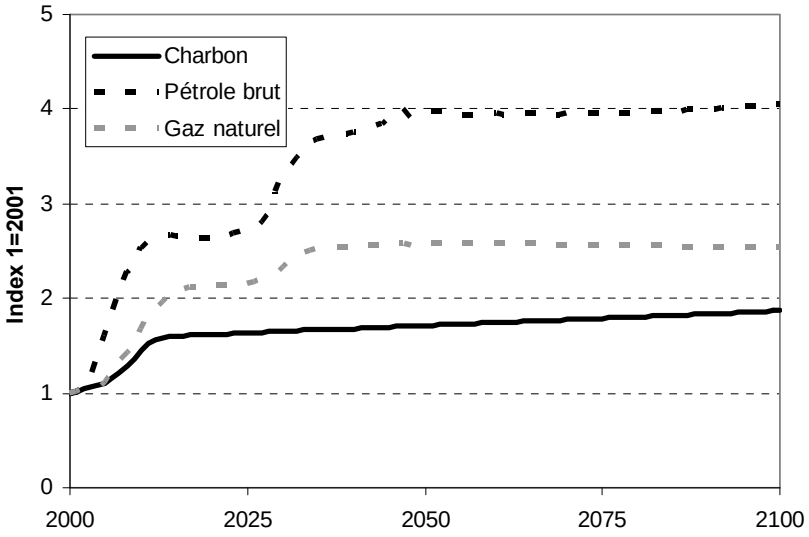


Figure 35 : Evolution des prix mondiaux des énergies primaires fossiles.

A la suite des deux chocs pétroliers et des hausses de prix de ces dernières années, la consommation de pétrole connaît un processus continu de repli vers ses usages captifs que sont le transport et la pétrochimie. Sans surprise, cette tendance se poursuit dans le scénario de référence et la part du transport dans la consommation des produits pétroliers passe de 58% en 2001 à 78% en 2030. La croissance ininterrompue des besoins de mobilité décrite en section 2.2 garantit une croissance soutenue des marchés pétroliers. Dans ce contexte, la formation des prix du pétrole en dehors des fluctuations de très court terme dépend des contraintes et des potentiels de modération qui pèsent sur la croissance de la demande de produits pétroliers. Tout l'enjeu est donc de comprendre le résultat de l'interaction, dans un cadre cohérent de changement technique endogène, entre :

- les contraintes qui vont peser à divers horizons de temps sur le développement de l'offre de pétrole,
- les potentiels d'innovations technologiques pouvant améliorer l'efficacité du moteur à combustion interne,
- la compétitivité de carburants alternatifs,
- les potentiels de rupture technologique susceptibles de fournir une nouvelle filière d'approvisionnement énergétique pour le transport,
- la réactivité des consommateurs à la hausse des prix et l'impact d'une hausse des prix du pétrole sur l'activité économique en général.

Il est aujourd'hui admis que la production de pétrole conventionnel hors Moyen-Orient va atteindre d'ici 2020 un plafond de sa production qui déclinera ensuite sous l'effet de la déplétion de ses réserves. La date de ce plateau peut être plus ou moins retardée grâce à l'amélioration des techniques d'extraction qui permettent une augmentation du taux de récupération du pétrole disponible dans les nappes. Dans la trajectoire de référence, compte tenu des hypothèses médianes qui ont été choisies pour le niveau des réserves et d'une hypothèse assez pessimiste sur la survenue du processus de déplétion à la moitié de l'exploitation des ressources initiales pour une nappe, ce

plateau est atteint assez rapidement, à savoir avant 2010. Ce phénomène de déplétion des ressources conventionnelles peut être partiellement compensé par la mise en production de pétroles non conventionnels qui rassemblent des forages ultra profonds, des pétroles bruts ultra lourds (majoritairement disponibles au Venezuela) ou des sables bitumineux (disponibles au Canada). Cependant, l'inertie dans le déploiement de ces nouvelles capacités de production ne permet pas de compenser la déplétion des ressources conventionnelles et la production de pétroles non conventionnels atteint 16.3 Mbl par jour à l'horizon 2030 pour une part de 15.1% de la production totale. Pendant cette période, le niveau de prix du pétrole dépend du comportement des acteurs du secteur au Moyen-Orient qui eux seuls ont un niveau de ressource suffisant pour augmenter leurs capacités d'extraction. Nous partons de l'hypothèse qu'avant d'être soumis à des contraintes de déplétion, ces acteurs visent un niveau de prix mondial du pétrole de l'ordre de 70$/Bl. Le pouvoir de marché ainsi créé ne peut être modéré à cet horizon de temps que par le niveau de réactivité de la demande finale (principalement dans le secteur des transports). Du côté des véhicules particuliers, le moteur à combustion interne couplé à un niveau d'hybridation plus ou moins grand avec une propulsion auxiliaire électrique garde des réserves de compétitivité assez importantes avec l'avantage de ne pas être soumis à la nécessité d'une rupture technologique (AIE, 2006). Si les potentiels d'amélioration technologique existent, la principale incertitude réside dans le fait de savoir si (i) d'une part, ces améliorations ne seront pas compensées par une augmentation de la taille des véhicules et de leur confort et si (ii) d'autre part les ménages modifieront leur stratégie de choix à l'achat des véhicules particuliers pour pondérer plus lourdement la place de l'efficacité énergétique. Dans la trajectoire de référence, les prix élevés du pétrole sur la période 2001-2030 engendrent des gains d'efficacité énergétique substantiels pour les véhicules particuliers (32 %) et dans une moindre mesure pour le transport de fret routier (25 %) où les marges de progrès sont plus réduites.

Jusqu'à ce que le Moyen-Orient atteigne son plateau de production (dans les années 2025) et soit contraint par la déplétion de ses réserves, le prix du pétrole reste inférieur à 70$/bl[32] et comme nous l'avons vu précédemment, les gains d'efficacité énergétique amortissent l'impact de ces prix hauts sur le système de transport et plus généralement sur le système productif. Pendant cette période et à ce niveau de prix du baril, les carburants alternatifs et en particulier les biocarburants, pour lesquels les filières de seconde génération n'ont pas encore atteint leur niveau de maturité, restent faiblement représentés dans la production mondiale de carburants liquides.

La situation change après l'entrée du Moyen-Orient en phase de déplétion dans les années 2027, car les capacités de production conventionnelles ne peuvent plus répondre à l'augmentation de la demande. Il s'en suit une augmentation rapide des prix (+1.5$/bl par an en moyenne sur la période 2027-2047). Cette hausse conduit à l'augmentation de la rentabilité des investissements dans les capacités de production de pétroles non conventionnels qui connaissent alors une croissance soutenue. De même, les filières de biocarburants dont les potentiels de production augmentent avec l'arrivée à maturité des technologies de seconde génération voient leur part de marché dans les carburants liquides augmenter rapidement (7.8% en 2035). La réaction technologique du côté de la demande est limitée par l'inertie de renouvellement des parcs de véhicules et la croissance de la

[32] Que ce chiffre soit d'ores et déjà dépassé n'est pas en soi inquiétant puisque ce type d'exercice de prospective ne prétend pas reproduire les aléas de court terme des marchés. On notera simplement, pour éviter les erreurs de perspective, il ne faut pas confondre les prix spot et les prix moyens d'achat sur une année (moyenne des marchés spots sur l'année et des contrats de long terme).

demande de produits pétroliers reste assez peu impactée par l'augmentation des prix. Dans ce cadre, le développement de capacités de production alternatives (biocarburants et pétroles non conventionnels) du côté de l'offre n'arrive pas à compenser la déplétion des ressources conventionnelles face à l'augmentation de la demande. Les prix continuent d'augmenter pour atteindre le niveau de 100$/bl qui a été fixé dans ce scénario de référence comme le seuil de rentabilité de la production de carburants de synthèse à partir de charbon (*Coal to liquid*, CTL). A partir de ce moment, le prix de vente du pétrole se fixe au prix de production de ce substitut et l'abondance des réserves de charbon ne fait pas craindre de contraintes de ressources sur l'horizon de temps de la simulation. Jusqu'à l'horizon 2050, la production de CTL reste limitée (moins de 1% de la production mondiale de carburants liquides) dans la mesure où d'une part (i) la hausse des niveaux de production des pétroles non conventionnels permet de compenser la déplétion des autres ressources pétrolières, la production mondiale de pétrole connaissant ainsi un plateau entre 2030 et 2050, (ii) et d'autre part la production mondiale de biocarburants augmente significativement pour atteindre son niveau de saturation à 1400 Mtep par an à l'horizon 2060. La production de CTL joue ainsi dans un premier temps le rôle d'un régulateur de l'augmentation des prix du pétrole en tant que produit de substitution. Après la saturation des potentiels de production de biocarburants qui coïncide avec le début de la diminution de la production mondiale de pétrole, les carburants ex-CTL deviennent peu à peu majoritaires dans la production de carburants liquides pour atteindre une part de 78% en 2100.

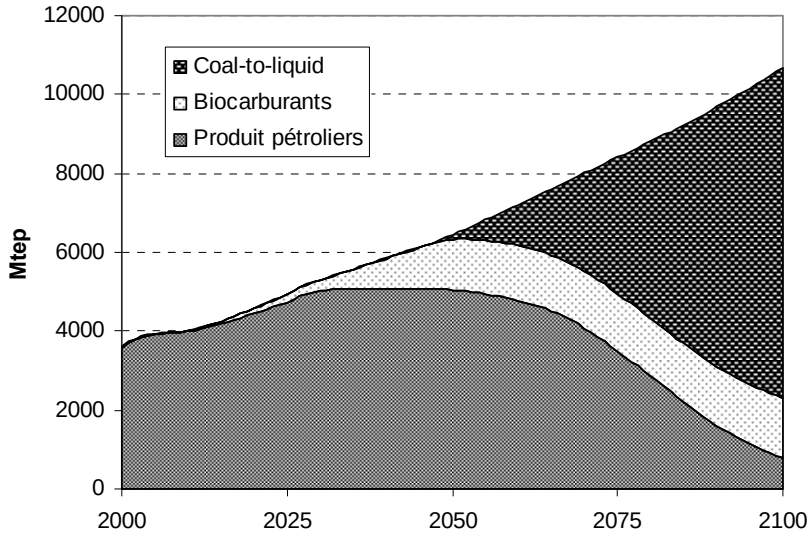


Figure 36 : Production mondiale de carburants liquides

En fait, l'ensemble de la dynamique du système est gouverné par trois paramètres centraux qui guident l'évolution de la demande captive adressée au pétrole conventionnel :

- Le premier concerne les filières énergétiques alternatives au couple carburants liquides / moteur à combustion interne pour le secteur des transports. Les études prospectives technologiques récentes (AIE, 2006) en recensent deux principales : (i) la filière électrique avec stockage de l'électricité en batteries et utilisation d'une motorisation électrique (ii) et

la filière hydrogène associé à une pile à combustible qui convertit ce vecteur énergétique en électricité pour alimenter une motorisation électrique, ou bien directement injecté dans un moteur à combustion interne. Dans les deux cas, l'hydrogène est stocké à bord du véhicule ou bien obtenu par réformage embarqué à partir d'hydrocarbures. Il est marquant de constater qu'au cours de cette trajectoire de référence, aucune de ces deux filières alternatives n'est en mesure d'atteindre un niveau de compétitivité pour pouvoir concurrencer la filière traditionnelle. Pour mieux comprendre ce résultat, il paraît utile de revenir ici un court instant sur les contraintes intrinsèques associées aux besoins énergétiques du secteur des transports. Plus qu'une source d'énergie, le secteur des transports requiert un vecteur énergétique qui soit facilement stockable et transportable. Bauquis (*in* Bauquis, 2004) fournit une illustration remarquable de la réserve de compétitivité des carburants liquides obtenus à partir d'hydrocarbures par rapport aux filières alternatives (Figure 37). Si des progrès technologiques dans le stockage de l'électricité ou de l'hydrogène sont attendus à long terme, la forte montée des prix du pétrole associée aux contraintes pesant sur la mise à disposition des ressources disponibles survient rapidement dans la trajectoire de référence. A cette échéance, ni la filière hydrogène ni la filière électrique n'ont la maturité nécessaire pour se substituer à grande échelle et à un coût raisonnable, au système énergétique traditionnel du secteur des transports. La montée des prix provoque ainsi une bifurcation vers un système de transport alimenté par des carburants synthétiques issus du charbon.

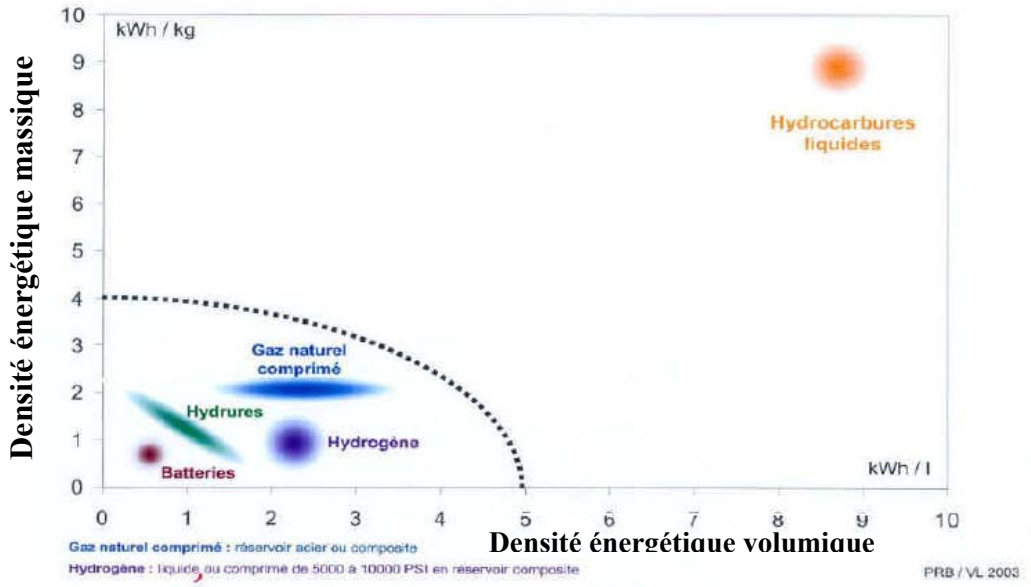


Figure 37 : Densité énergétique massique et volumique d'une sélection de vecteurs énergétiques (source Bauquis, 2004)

- Le deuxième est l'ensemble des contraintes géologiques et techniques pesant sur le rythme de mise à disposition des ressources pétrolières, que notre approche de modélisation permet d'expliciter. Elle permet de confirmer l'apparition de fortes tensions sur le prix du pétrole à un horizon de temps assez proche (avant 2030). Ces tensions ne sont pas nécessairement dues à un phénomène de rareté puisqu'elles interviennent à une période où seulement 25% des ressources restantes en 2001 ont été exploitées et où le ratio réserve sur production vaut

65 années. Elles sont en revanches dues à une contrainte sur le débit maximal de production pétrolière sur lequel vient buter une demande en forte croissance.

- Le troisième est la faiblesse de la réaction sur la demande que provoque une augmentation assez brutale des prix du pétrole ; celle-ci s'infléchit faiblement et passe d'un taux de croissance annuel de 1.5% par an en 2025 à 0.94% en 2040, pendant l'augmentation importante des prix qui intervient sur cette période. L'explication de cette faible réactivité réside simultanément dans : (i) des choix de développement et des politiques d'infrastructures orientés vers le mode routier qui contraignent la marge de manœuvre du système économique en général vis-à-vis d'une réduction éventuelle de la consommation de transport, (ii) un impact macroéconomique de l'augmentation des prix qui reste faible chez les régions fortement consommatrices (Figure 31) et qui garantit une poursuite de l'augmentation générale du revenu des ménages, (iii) une mutation technologique lente mais non négligeable vers des équipements plus efficaces et moins dépendants de la consommation de carburants pétroliers qui permet de limiter l'augmentation du prix final des services énergétiques.

Ce type de dynamique, qui lie le changement technique, la vitesse d'apparition des contraintes géologiques et la rigidité de la demande, peut être inversée en cas d'apparition de frictions au moment de la mise en production des carburants synthétiques. En effet, nous avons, dans cette trajectoire, fait l'hypothèse que le volume de production de carburants synthétiques n'était pas limité par des contraintes liées à la disponibilité des capacités de production qui proviendraient d'erreurs d'anticipation sur leur rythme de développement. Ceci déboucherait sur une sorte de scénario catastrophe puisque ces produits ne joueraient plus le rôle de substitut et des périodes de prix très élevés pourraient apparaître. Il s'agirait en fait d'un scénario extrême, intéressant d'ailleurs à étudier, mais que nous laisserons de côté dans la suite de cette thèse. En dehors des frictions dans le développement de nouvelles capacités de production, le niveau de prix d'équilibre à long terme reste toutefois assez robuste.

En ce qui concerne l'évolution des prix des autres énergies fossiles primaires, le prix du gaz reste partiellement indexé sur celui du pétrole en début de période puis se désindexe à partir du moment où celui-ci dépasse 80$/bl. Les prix du charbon connaissent quant à eux une hausse modérée dans la mesure où cette ressource n'est pas menacée par la déplétion sur la période de la simulation et où des investissements dans les infrastructures d'extraction et de transport sont effectués à temps tout au long de la trajectoire pour permettre à ce secteur de répondre à la croissance de la demande.

Au total, l'effet conjugué des variations des prix relatifs des énergies et de l'évolution de la composition structurelle de la consommation de services énergétiques, fait que la structure de la demande finale d'énergie évolue de façon modérée sur le siècle (Figure 38). Le principal trait marquant est la croissance permanente de la part de l'électricité, principalement sous l'influence des consommations résidentielles, industrielles et du secteur des services. Quant au carburant liquide, après un net tassement, il représente encore de l'ordre de 40% de demande énergétique totale en 2100 en raison de la dynamique des besoins en transport.

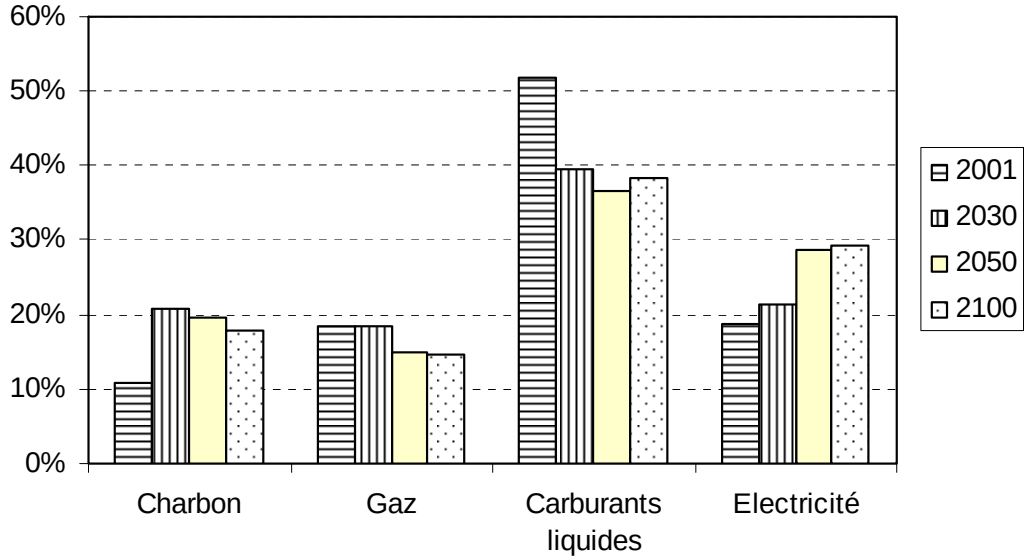


Figure 38 : Consommation finale d'énergie par source à l'échelle mondiale, sélection d'années

3.3 L'évolution du système électrique

Dans la trajectoire de référence, la demande d'électricité à l'échelle mondiale est multipliée par 6.8 sur la période 2001-2100. Cette augmentation est un peu amortie au niveau de la production grâce aux progrès effectués sur la réduction des pertes en ligne mais correspond tout de même à la nécessité de fournir annuellement 79225 TWh de plus en 2100 qu'en 2001 dont 67% dans les régions non Annexe 1. Cette croissance de la production s'effectue dans le cadre d'une modification de la géographie de la demande mondiale et d'une augmentation générale des prix des énergies fossiles que nous avons décrite dans la sous-section précédente, particulièrement marquée pour le pétrole et le gaz, et qui change totalement les rapports de compétitivité des différentes technologies de production d'électricité.

Nous partons ainsi d'une situation en début de période où le gaz représente la majorité des investissements dans les nouvelles capacités de production. Ils représentent 70% des *nouvelles capacités* en 2001 pour les régions de l'Annexe 1 et 40% dans les régions non Annexe 1. Ces investissements concernent principalement des centrales à cycles combinés utilisées pour la génération d'électricité en période de base. Les centrales à gaz à cycle simple sont construites pour répondre à la demande de pointe ou pour la génération décentralisée (principalement dans les économies émergentes pour ce dernier usage). Progressivement, la forte augmentation des prix du gaz sur la période 2001-2030 modifie cette répartition des investissements et, dans toutes les régions du modèle, les technologies gaz sont délaissées pour la production d'électricité en base mais restent compétitives pour la pointe. La part des technologies gaz dans les *nouvelles capacités* construites se réduit ainsi à 10% environ après 2030 pour les régions Annexe 1 et non Annexe 1. Du fait de la diminution de la part des technologies gaz dans les investissements, l'apprentissage lié aux nouvelles capacités construites conduit à une décroissance plus lente du coût en capital des centrales

à cycle combiné. De manière concomitante, le rendement de ces centrales est amélioré de 7% pour atteindre 62% en fin de période.

L'ensemble du secteur connaît un retour important vers l'utilisation du charbon dans les technologies de production. La part de ces technologies dans la production d'électricité passe ainsi à l'échelle mondiale de 38% en 2001 à 62% en 2030 puis 65% en 2100 (Figure 39). Les investissements sont concentrés en début de période dans les régions non Annexe 1 où ils représentent dès le début de la période 36% des nouvelles capacités installées. Avec la hausse importante des prix du gaz, la part des technologies charbon dans les nouveaux investissements augmente dans toutes les régions, en particulier dans les pays de l'Annexe 1 où elle atteint 48% en moyenne après 2030. Dans les régions non Annexe 1 cette part vaut sur la même période 56%. Ce regain d'intérêt pour la génération électrique à base de charbon induit d'importants progrès sur les technologies avancées comme les centrales super critiques ou à gazéification, leur coût en capital étant diminué de 18% sur toute la période pour la première et de 27% à l'horizon 2040 pour la seconde au moment où l'asymptote est atteinte. La pénétration importante de ces technologies avancées dans le parc de génération électrique mondial permet d'améliorer significativement le rendement moyen des technologies à base de charbon qui part au niveau mondial de 32% en 2001 pour se stabiliser à 45% en 2060. Il faut remarquer ici la forte inertie du secteur dans la mesure où les technologies de génération avancées commencent à représenter une part importante des nouveaux investissements à partir de 2025.

Le parc de production renouvelable (non hydraulique) connaît une croissance soutenue avec un taux annuel moyen de 3.4% sur l'ensemble de la période et atteint finalement une part de 8.1% dans la production mondiale d'électricité à l'horizon 2100. Le détail régional de la pénétration des énergies renouvelables reste contrasté dans la mesure où ces technologies sont plus facilement sélectionnées dans les régions étant dotées de peu de ressources fossiles ; en Europe par exemple, la part de marché de ces technologies dans la génération d'électricité atteint 22.5% en 2100. Ces investissements induisent d'importantes réductions de coût en capital pour les technologies éoliennes *onshore* et *offshore* (respectivement -36% pour les premières et -44% pour les secondes) qui atteignent toutes les deux leurs asymptotes avant 2060. Une hypothèse conservatrice sur ses potentiels de développement conduit la génération hydraulique à perdre des parts de marché tout au long de la trajectoire malgré une hausse des prix des énergies fossiles qui lui est *a priori* favorable.

La question de la technologie nucléaire est délicate. Son déploiement dans le parc de production ne dépend que partiellement de ses caractéristiques technico-économiques et demeure fortement influencée par un contexte politique à deux dimensions : la première est celle de l'acceptabilité des nouvelles installations dans les pays de l'OCDE qui est limitée, soit en raison d'attitudes de bannissement du nucléaire (Suède, Allemagne, Italie, etc.) soit, de façon plus indirecte en raison de difficultés associées à l'implantation de nouveaux sites de production. La deuxième tient à la défiance politique vis-à-vis de la prolifération de cette technologie en particulier dans les pays émergents. Cette situation se traduit dans le modèle par la présence de coûts intangibles élevés associés à cette technologie lors du calcul de la composition technologique des investissements du secteur électrique. Au-delà d'un certain seuil d'augmentation des prix du charbon et du gaz nous faisons l'hypothèse que ces verrous d'acceptabilité peuvent être levés puisque la disponibilité à payer pour le refus du nucléaire devient inférieure à ses avantages, les coûts intangibles associés à cette technologie entrent alors dans une dynamique de décroissance. En fin de compte, cette

formalisation n'interdit pas la pénétration du nucléaire mais l'autorise, de façon décalée par rapport à l'expression d'une rationalité économique pure.
Ceci explique que le nucléaire perde des parts de marché à moyen terme malgré une rentabilité avérée dès les premières années de la simulation. Cette situation change partiellement avec l'arrivée de la hausse brutale des prix du gaz et à partir de 2030, cette technologie reprend donc de l'importance pour contribuer en 2100 à la hauteur de 19% de la production mondiale d'électricité.

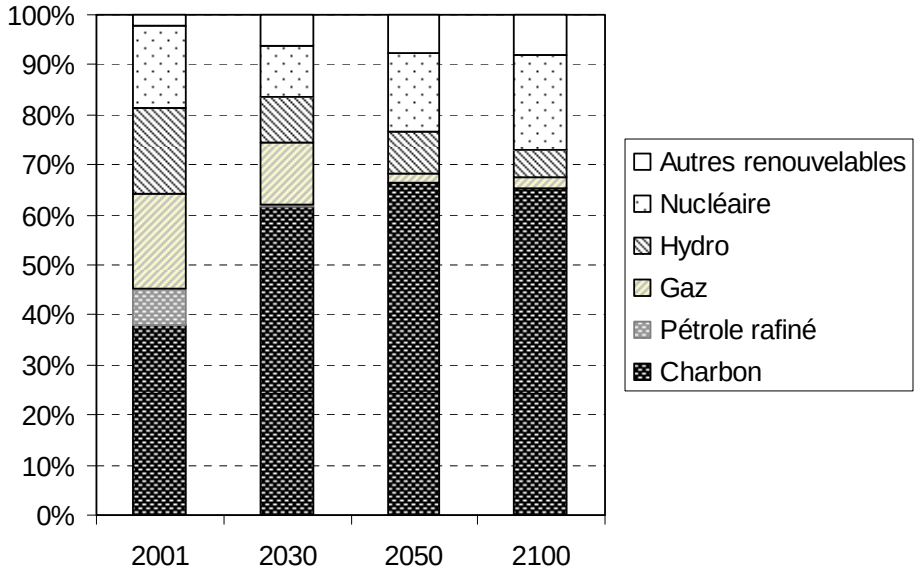


Figure 39 : Production d'électricité par technologies, monde, sélection d'années

La présentation de ces résultats qui montre un net regain de compétitivité pour les technologies de production d'électricité à partir de charbon et une quasi-disparition des technologies à base de gaz conduit à rappeler certaines hypothèses capitales pour leur compréhension. Tout d'abord, le prix du carbone est nul et anticipé comme tel dans toutes les régions du modèle dans l'ensemble de la trajectoire de référence. Vu le poids que peut avoir une valeur du carbone, même faible, sur le coût d'utilisation de technologies de production à base de charbon il est légitime de voir le modèle abandonner les technologies de génération gaz beaucoup plus rapidement que ce qui est observé aujourd'hui, en Europe par exemple, en période de prix du gaz élevés. Ensuite, les structures de marché libéralisé pour l'électricité qui se généralisent aujourd'hui et qui ne sont pas représentées dans le modèle peuvent conduire les acteurs de ces marchés à choisir plus facilement des technologies de production gaz qui sont moins intensives en capital et plus rapidement construites que celles à base de charbon.

4 Niveau et composition de la trajectoire d'émission

4.1 Des émissions en forte croissance

Au cours de la trajectoire de référence, les émissions annuelles de carbone imputées à l'utilisation des combustibles fossiles augmentent de 32.4 GtC par rapport à l'année 2001, pour

atteindre 38.8 GtC en 2100 (Figure 40), ce qui correspond à une multiplication par 6. Les régions non Annexe 1 sont responsables de 68% de cette augmentation et, à l'échelle mondiale, les émissions par tête passent de 1.06 tC en 2001 à 3.78 tC en 2100. S'il s'opère au cours de la trajectoire un rattrapage important des pays de l'Annexe 1 par les pays non Annexe 1 en termes d'émissions *per capita* : un habitant des régions Annexe 1 émet en moyenne 3.9 fois plus de carbone qu'un habitant des régions non Annexe 1 en 2100 alors qu'il en émettait 5.9 fois plus en 2001, l'écart en fin de période reste tout de même significatif. En revanche, la distribution géographique des émissions est radicalement modifiée au cours de la simulation et les régions de l'Annexe 1 passent d'une part de 63% dans les émissions mondiales en 2001 à 40% en 2050 et 37% en 2100.

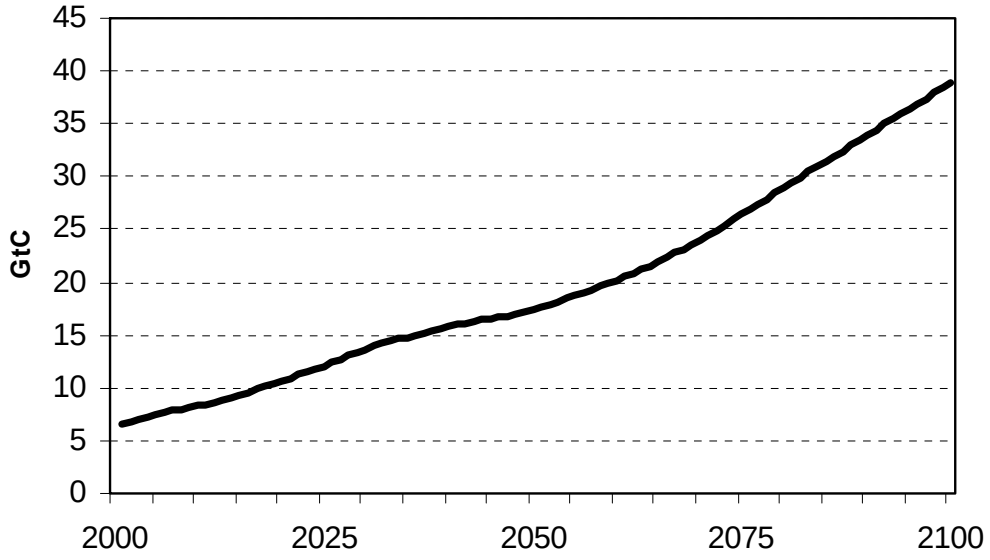


Figure 40 Emissions mondiales de carbone (GtC)

La répartition des émissions parmi les secteurs change aussi radicalement au cours de cette trajectoire (Figure 41). Sous l'effet conjugué de l'importance croissante de l'électricité dans la demande finale, de la pénétration massive du charbon dans le système de génération électrique et de la production à grande échelle de carburants de synthèse pour les transports après 2050 (se reporter à la section 3 pour plus de détails), la part du dioxyde de carbone émis directement au niveau de la consommation finale d'énergie diminue régulièrement (de 57% en 2002 à 36% en 2100) et c'est dans le système de transformation d'énergie primaire en énergie finale que se situe progressivement, la principale source d'émissions de CO2. En fait, cela se fait selon des périodes assez distinctes et dans un premier temps, sur la période 2001-2050, c'est la part de la production d'électricité dans le total des émissions qui augmente pour atteindre 45% en 2050. Ensuite la production de carburants synthétiques à partir de charbon, très intensive en CO_2, gagne de l'importance régulièrement jusqu'à une part de 27% en 2100. Parmi les secteurs émetteurs à la consommation finale de l'énergie, la part de l'industrie augmente légèrement en début de période à cause de la substitution vers le charbon qui s'opère dans ce secteur, puis décroît sensiblement pour atteindre 12% en 2100. La part du transport est faiblement décroissante au cours de la trajectoire et

se stabilise au voisinage de 17% en fin de période. Les autres secteurs de consommation finale ont une part assez réduite dans les émissions directes de CO_2 qui décroît tout au long de la trajectoire.

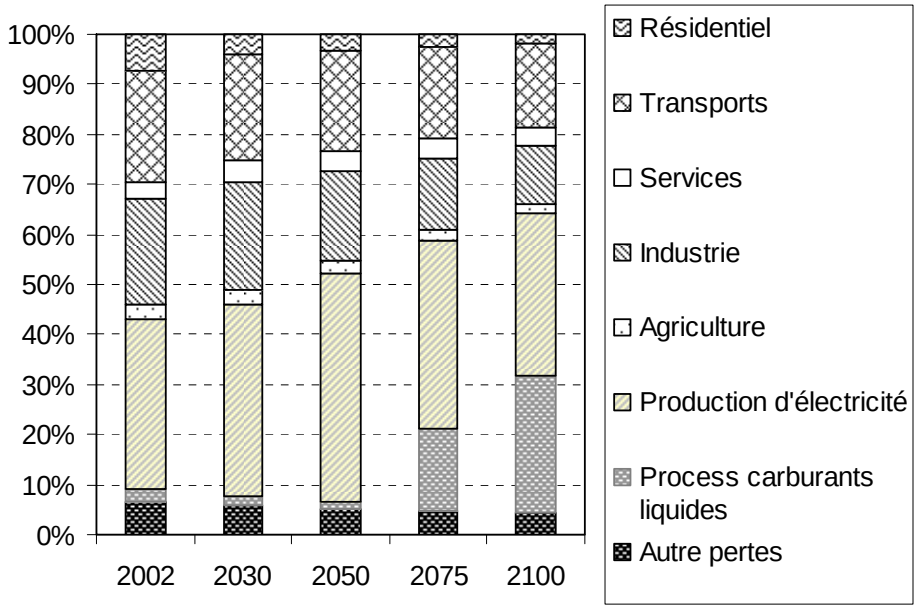


Figure 41 : Répartition des émissions mondiales de CO_2 par source.

Il est enfin intéressant, du côté des politiques, de réaffecter sur les usages finaux les émissions issues du système transformation (Figure 42). Cette réaffectation fait apparaître une dynamique en deux temps. *Sur la première moitié de la simulation*, la part des secteurs de production (industrie, agriculture, service) augmente au détriment des secteurs de transport et du logement passant de 57% en 2002 à 62% en 2050. Cette augmentation est principalement due au secteur des services dont la part augmente de 12% en 2002 à 16% en 2050. Le secteur industriel reste stable avec une contribution voisine de 39% sur cette période. Sur la *seconde moitié de la simulation*, la part des transports augmente vigoureusement pour passer de 23% en 2050 à 44% en 2100. La répartition des émissions allouées aux usages finaux change donc fortement au cours de la trajectoire avec une part des secteurs de production qui atteint 45% en 2100 et le secteur des transports apparaît clairement comme le responsable du dérapage des émissions sur le long terme.

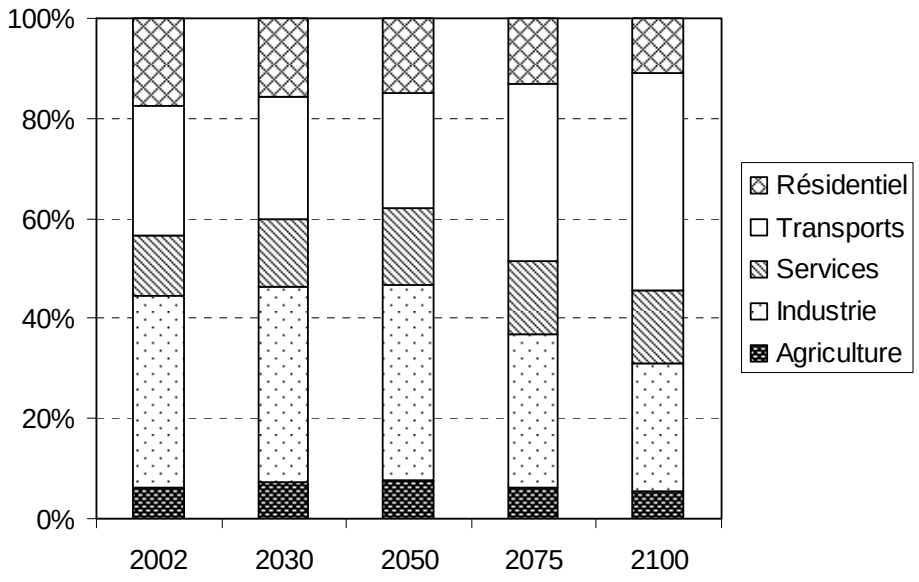


Figure 42 : Répartition des émissions mondiales de CO_2 par secteur de consommation finale.

4.2 Une interprétation en termes d'identité de Kaya

Avec un montant de 2100 GtC, les émissions cumulées sur la période 2001-2100 obtenues dans notre trajectoire de référence se situent nettement dans le dernier quartile, mais ne dépassent pas la borne supérieure se situant à 3078 GtC, de l'intervalle des scénarios étudiés par Nakicenovic et *al.* (2006). Cet ensemble de scénario dépasse celui produit lors de l'exercice SRES présenté dans la Figure 29, puisqu'il rassemble aussi les exercices de modélisation effectués jusqu'en 2001. Afin de clarifier le positionnement de notre trajectoire d'émissions dans le paysage des scénarios disponibles dans la littérature, nous allons utiliser la grille d'analyse proposée par Nakicenovic et *al.* (2006) qui repose sur l'utilisation de l'identité de Kaya (Voir section 1) pour une analyse *ex-post* des résultats obtenus dans les différents scénarios. Pour cela, les auteurs proposent un exercice de pensée qui consiste à construire, à partir de chaque scénario d'émissions, deux trajectoires hypothétiques : la première, notée par la suite C-PIB, garde tous les termes de l'identités de Kaya constants et égaux à leur valeur initiale sauf pour la population et la richesse par habitant, la seconde, notée par la suite C-ATEP, introduit en plus l'évolution de l'intensité énergétique du PIB, le contenu carbone unitaire de l'énergie primaire restant constant. La Figure 43 compare les résultats obtenus avec notre trajectoire de référence à ceux produits par Nakicenovic et *al.* (, dans leur revue de la littérature, pour les émissions de carbone cumulées sur la période 2001-2100 des deux scénarios hypothétiques présentés ci-dessus et du scénario en lui-même.

Avec un budget d'émission de carbone de 2705 GtC sur la période 2001-2100 pour la trajectoire C-PIB, le scénario de référence ici présenté se situe à proximité de la médiane des scénarios étudiés par Nakicenovic et *al.* (2006). Ceci traduit un positionnement central de notre scénario quant aux évolutions de la démographie et de la richesse par habitant. La situation change lorsque l'on considère de scénario C-ATEP. Nakicenovic et *al.* (2006) identifient des réductions de 41% à 49%

du total des émissions cumulées grâce aux gains d'intensité énergétique entre les variantes C-PIB et C-ATEP. La trajectoire obtenue avec IMACLIM-R atteint quant à elle, entre ces deux scénarios, une réduction d'émission de 28%. De même, la décarbonisation du système énergétique permet d'obtenir dans l'étude de Nakicenovic et *al.* (2006) une réduction finale de 46% à 63% par rapport au scénario C-PIB alors que le scénario ici présenté révèle une hausse de l'intensité carbone du secteur énergétique conduisant à une augmentation de 8% des émissions cumulées par rapport à la trajectoire C-ATEP correspondante.

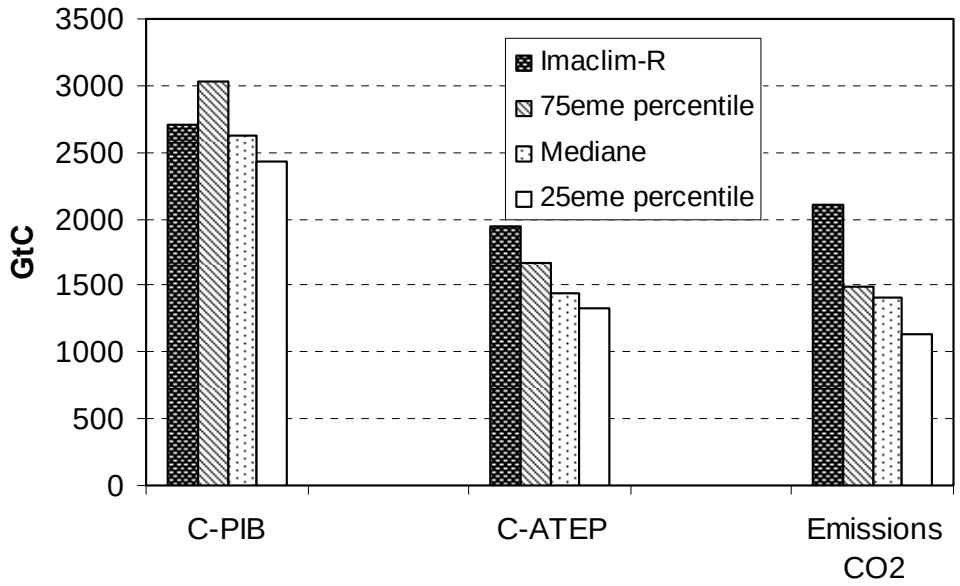


Figure 43 : Valeur médiane, du premier quartile et des trois premiers quartiles des émissions mondiales cumulées sur la période 2001-2100 pour les scénarios étudiés par Nakicenovic et *al.* (2006) plus le scénario de référence proposé dans cette thèse. Le scénario C-PIB correspond au premier scénario hypothétique décrit ci-dessus et le scénario C-ATEP au second.

Cette remise en perspective des résultats obtenus dans le paysage des trajectoires récemment produites par la littérature permet d'ores et déjà d'isoler deux caractéristiques agrégées importantes de notre scénario :

- les réductions de l'intensité énergétique du PIB obtenues *ex-post* dans notre simulation sont inférieures à celles communément livrées,
- la trajectoire de l'intensité carbone du système énergétique suit une dynamique inverse de celle majoritairement obtenue dans les autres scénarios.

Ces résultats appellent un approfondissement de l'analyse pour déterminer s'ils procèdent de divergence quant à aux choix de paramétrage du modèle ou s'ils découlent de l'interaction endogène entre différents mécanismes modélisés dans la structure IMACLIM-R et négligés dans d'autres modèles. Avant cela, il convient de rappeler ici que ces résultats sont en concordance avec l'analyse empirique récemment menée par Raupach et *al.* (2007) dont les résultats sont reproduits en Figure 44. Cette étude révèle en effet que l'accélération subite des émissions de CO_2 sur la période 2000-2004 découle d'une interruption simultanée des tendances de réduction de l'intensité énergétique des économies et de décarbonisation des systèmes énergétiques couplée à une croissance continue de la population et de la richesse par habitant. Détaillés à l'échelle régionale,

ces résultats confirment un arrêt de la décarbonisation spontanée des secteurs énergétiques à la fois pour les économies avancées et les pays en développement.

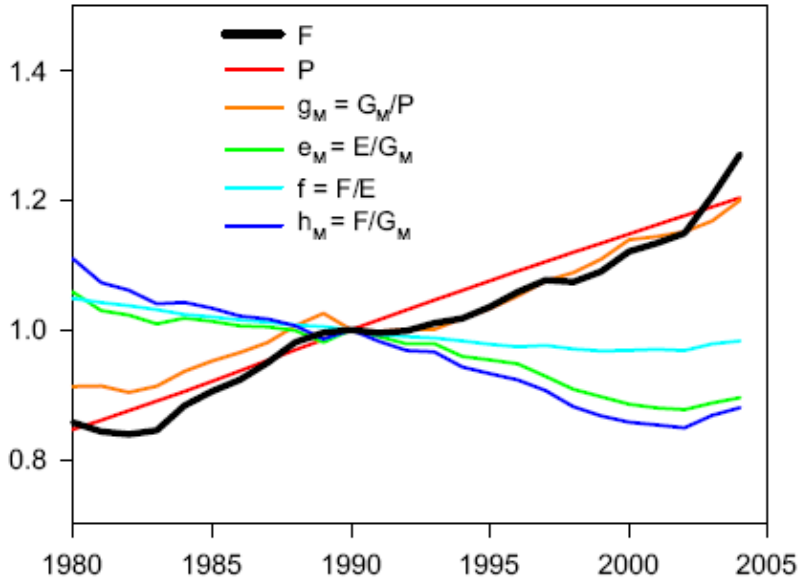


Figure 44 : Evolution en indice (1=1990) des composantes de l'identité de Kaya pour les émissions mondiales (source : Raupach et *al.*, 2007). F=émissions de CO_2 dues à l'utilisation des combustibles fossiles, P=population, g_M=richesse par habitants, E_M=intensité énergétique du PIB, f=intensité carbone de l'énergie primaire, h_M=émissions par habitant.

L'analyse de l'évolution des composantes de l'identité de Kaya pour notre scénario de référence révèle l'importance de l'interaction entre la structure de la croissance économique, son contenu en énergie et la composition technologique du secteur énergétique dans l'évolution des émissions mondiales de CO_2. Notre scénario a l'originalité de présenter *ex-post* des réductions d'intensité énergétique moins importantes que les autres scénarios et une tendance à la carbonisation du système énergétique.

L'évolution de l'intensité énergétique du PIB au cours d'une trajectoire dépend à la fois du degré de dématérialisation de l'économie, de l'évolution de l'efficacité énergétique des équipements de demande finale et de l'efficacité globale du système de transformation énergétique qui convertit l'énergie primaire en énergie finale. Dans notre scénario, le rapport entre la consommation finale d'énergie et le PIB diminue de 47% sur l'ensemble de la trajectoire (Figure 45) ; si on exclut la consommation d'énergie du secteur des transports, cette diminution s'élève à 51%. En revanche l'efficacité agrégée du système de transformation énergétique perd 10% pour atteindre 55% en fin de période. En fin de compte, les gains d'efficacité énergétique touchant les équipements de consommation finale d'énergie et le changement structurel de l'économie conduisant à sa dématérialisation sont partiellement compensés par les dynamiques spécifiques du secteur des transports et les pertes d'efficacité du système de transformation énergétique. Ces deux derniers facteurs sont les clés de l'explication de la faible réduction de l'intensité énergétique du PIB et de la carbonisation du système énergétique que l'on rencontre dans cette trajectoire.

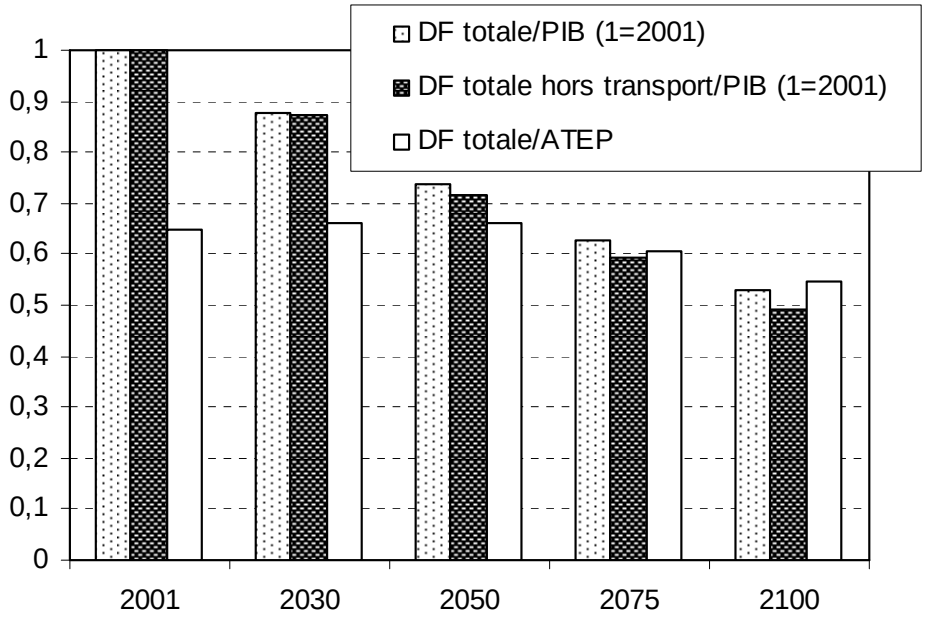


Figure 45 : Evolution du rapport entre la demande finale (DF) d'énergie et le PIB, du rapport entre la demande finale d'énergie hors transport et le PIB, et du rendement du système de transformation énergétique

La Figure 46 représente la trajectoire du scénario de référence dans l'espace intensité énergétique du PIB mondial – intensité carbone du système énergétique mondial. Au cours de la période, l'intensité carbone du système énergétique augmente de 16% et l'intensité énergétique du PIB diminue de 58%. Dans cette dynamique, nous pouvons isoler trois étapes caractéristiques :

- De 2001 à 2030, l'intensité carbone du système énergétique augmente de 6% par rapport au début de la période sous l'effet, dans un premier temps, de la forte croissance des PED qui ont un système électrique plus orienté vers l'utilisation du charbon. Le phénomène s'accélère ensuite sur la période 2020-2030 avec la forte augmentation des prix du gaz qui engendre un retour vers le charbon pour la production électrique dans les régions de l'Annexe 1. La dématérialisation des économies, les gains d'efficacité énergétique pour les équipements d'usage final, et la pénétration de technologies avancées pour le charbon dans le secteur électrique permettent une diminution de l'intensité énergétique du PIB de 32% sur l'ensemble de la période.
- De 2030 à 2050, la forte augmentation des prix du gaz et du pétrole induit à la fois des gains d'efficacité énergétique importants, une pénétration des biocarburants dans le secteur des transports et des technologies nucléaires ou renouvelables dans le secteur électrique. Cette orientation vers des énergies peu ou pas carbonées conduit à une diminution de l'intensité carbone qui atteint un niveau supérieur de 3% à son point de départ en 2050. L'intensité énergétique diminue encore sur la période de 16%.
- De 2050 à 2080, les potentiels de production des biocarburants sont atteints et la pénétration des technologies non émettrices dans le secteur électrique est freinée par des prix du charbon qui augmentent peu. La demande de carburants liquides émanant du secteur des transports continue d'augmenter et la technologie de production de carburants de synthèse à partir de charbon pénètre largement. En l'absence de séquestration du CO_2, cette filière de

production induit 2.7 fois plus d'émissions par litre de carburant liquide en moyenne que la filière classique à base de pétrole. De plus, les pertes liées à cette nouvelle technologie sont beaucoup plus importantes que celles associées au raffinage du pétrole brut. La conjonction de ces deux caractéristiques conduit à une augmentation de l'intensité carbone de 16% ainsi qu'à une quasi-compensation des gains d'efficacité énergétique des autres secteurs et du phénomène de dématérialisation des économies.

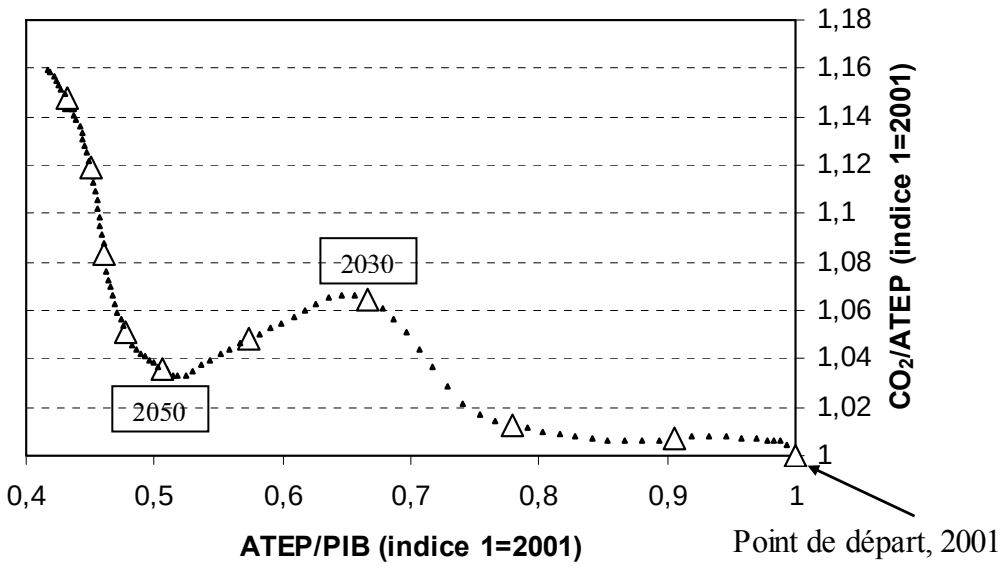


Figure 46 : Trajectoires du scénario de référence dans l'espace intensité énergétique du PIB mondial – intensité carbone du système énergétique mondial

Chaque point correspond à une année, et les symboles de taille supérieure marquent les décennies.

Finalement, l'augmentation de l'intensité carbone du système énergétique et la diminution limitée de l'intensité énergétique du PIB au cours de la trajectoire sont largement dues à la bifurcation technologique vers une production de carburants liquides synthétiques à partir de charbon. A partir de ce moment-là, les gains d'efficacité énergétique ou liés à la dématérialisation des économies sont compensés par le faible rendement de cette filière et sa forte intensité carbone. La survenue de cette bifurcation résulte de l'interaction à court terme entre une demande de transport aux dynamiques spécifiques et des contraintes s'exerçant sur le niveau de production de pétrole brut. Ce point est suffisamment critique pour que nous en étudiions les déterminants et la robustesse de façon plus systématique. C'est à ce point précis que nous consacrons le chapitre suivant. En effet, si l'on tient compte du fait que notre scénario de croissance est relativement modéré tant en termes purement économiques que par sa transcription matérielle, l'existence d'une telle bifurcation serait une mauvaise nouvelle, puisqu'elle signifierait qu'il y a de grandes probabilités pour que des scénarios d'émission nettement supérieurs à ceux aujourd'hui envisagés se réalisent. Et ce en particulier, si l'on envisage des taux de croissance de l'économie mondiale et, surtout, des rattrapages de la consommation matérielle des pays développés par les pays en développement un tant soit peu supérieurs à ceux qui dérivent de nos simulations (phase de rattrapage de la productivité du travail légèrement plus longue, asymptotes légèrement supérieures pour certains types de consommation).

Bibliographie

AIE, 2006, “Energy Technology Perspectives: Scenarios and Strategies to 2050”, *OECD/IEA* , Paris, France.

Bauquis, R., 2004, « Quelles énergies pour les transports au XXI^{eme} siècle ? », *Revue de l’énergie*, 561, pp. 569-585.

Castles I., Henderson D., 2003, “The IPCC Emission Scenarios: An Economic-Statistical Critique”, *Energy & Environment*, vol. 14 (2-3), pp. 159-185.

Commoner, B., 1971, *The Closing Circle*, Knopf, New York.

GIEC, 2007, “Further work on scenarios, Report from the IPCC Expert meeting towards new scenarios”, http://www.ipcc.ch/meetings/session28/doc8.pdf

Hourcade J.C., Journé V., 2002, « Monsieur Homais, les guides de montagne et le maître nageur : variations sur la négation des risques climatiques », *Critique Internationale*, 26, pp. 65-79.

Leggett, J., W.J. Peppe, R.J. Swart, J.A. Edmonds, L.G. Meira Filho, I. Mintzer, M-X. Wang et J. Wasson, 1992 : Emissions Scenarios for IPCC: An Update. In *Climate Change 1992. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*, Houghton, J.T., B.A. Callander et S.K. Varney (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, pp. 69-96.

Lomborg B., 2001, *The Skeptical Environmentalist*, Cambridge University Press, 515 p.

McKibbin, W., Pearce, D., Stegman, A., 2004, “Long Run Projections for Climate Change Scenarios”, *Working Papers in International Economics*, Lowy Institute for International Policy, May 2004, No. 1.04, 71 pp. http://www.oecd.org/dataoecd/7/32/35912503.pdf

Morita T., Lee, H-S, 1997, *Emission scenario database prepared for IPCC Special Report on Emission Scenarios*. Disponible sur http://sres.ciesin.org/index.html.

Nakicenovic N., Alcamo J., Davis G., de Vries B., Fenhann J., Gaffin S., Gregory K., Grübler A., Jung T.Y., Kram T., La Rovere E.L., Michaelis L., Mori, S. Morita, T. Pepper, W. Pitcher, H. Price L., Riahi K., Roehrl A., Rogner H.-H., Sankovski A., Schlesinger M., Shukla P.R., Smith S., Swart R., van Rooijen S., Victor N., Dadi Z., 2000, IPCC *Special Report on Emissions Scenarios*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 599p.

Nakicenovic, N., Grübler, A., Gaffin, S., Jung, T.-T., Kram, T., Morita, T., Pitcher, H., Riahi, K., Schlesinger, M., Shukla, P.R., van Vuuren, D., Davis, G., Michaelis, L., Swart, R., Victor, N., 2003, “IPCC SRES revisited: a response”, *Energy & Environnment* 14 (2–3), pp. 187–214.

Nakicenovic, N., Kolp, P., Riahi, K., Kainuma, M., Hanaoka, T., 2006, “Assessment of emissions scenarios revisited”, *Environmental Economics and Policy Studies* **7** (3), pp. 137–173.

Raupach, M., Marland, G., Ciais, P., Le Quéré, C., Canadell, J., Klepper, G., Field, C., 2007, "Global and regional drivers of accelerating CO_2 emissions", *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 104 (24), pp. 10288–10293.

Roehrl, R.A., Riahi, K., 2000. "Technology dynamics amd greenhouse gas emissions mitigation—a cost assessment.", *Technological Forecasting and Social Change* 63 3, pp. 231–261.

Chapitre 5

Tests paramétriques et robustesse du scénario de référence : à la recherche d'effets systémiques

Table des matières

1 VARIANTES TESTEES 197

2 LES CONDITIONS D'OBTENTION D'UN SCENARIO DE REFERENCE A « BASSES » EMISSIONS 199

3 IDENTIFICATION DE MECANISMES « TIRANT » LA TRAJECTOIRE D'EMISSION VERS LE HAUT 203

3.1 UN DEVELOPPEMENT SOBRE EN ENERGIE RALENTIT LE RYTHME DES GAINS D'EFFICACITE ENERGETIQUE 204
3.2 EFFET DE « MASQUE » DU PRIX DE L'ENERGIE ET RISQUE DE « *LOCK-IN* » DANS DES TRAJECTOIRES INTENSIVES EN TRANSPORT 206
3.3 EFFETS REBOND ET REDUCTIONS D'INTENSITE ENERGETIQUE 209
3.3.1 Les différents types d'effet rebond 209
3.3.2 Les effets rebond sectoriels directs 210
3.3.3 Les effets rebond macroéconomiques 212

CONCLUSION 213

BIBLIOGRAPHIE 215

Nous avons présenté dans le chapitre précédent un scénario de référence qui a la particularité de conduire à une trajectoire d'émission élevée par rapport aux scénarios existants dans la littérature. Ce scénario a été obtenu malgré des hypothèses plutôt basses adoptées pour les fondamentaux de la croissance économique, et des hypothèses médianes retenues pour les potentiels d'évolutions techniques associés aux gains d'efficacité énergétique ou aux filières d'offres énergétiques alternatives. L'objet de ce chapitre est de comprendre ce résultat. Pour cela, nous nous appuyons principalement sur un jeu de tests de sensibilité que nous appliquons à des paramètres clés du modèle. Ces tests nous permettent de mettre en lumière les **effets de système** produits par les interactions endogènes entre paramètres qui n'apparaissent pas toujours clairement dans la littérature, de plus, cette analyse nous donne la possibilité d'apprécier la **robustesse des résultats** obtenus.

1 Variantes testées

Procéder à des tests numériques de sensibilité sur les résultats obtenus est une approche répandue en modélisation lorsqu'il existe des intervalles d'incertitude importants sur les paramètres qui conditionnent le fonctionnement du modèle et que ce dernier est trop complexe pour pouvoir être résolu analytiquement. La démarche communément adoptée est de faire varier un ou plusieurs paramètres d'entrée d'un ordre de grandeur comparable à la taille de l'intervalle d'incertitude dans lequel ils peuvent être fixés. L'étude de sensibilité revient ensuite à comparer l'ordre de grandeur des variations obtenues sur les résultats du modèle aux variations qui ont été appliquées aux paramètres d'entrée.

Dans un modèle hybride d'équilibre général multi-régions et multi-secteurs, tel que le modèle IMACLIM-R, le grand nombre de paramètres qui déterminent son fonctionnement et le temps nécessaire pour procéder à une simulation interdisent de pratiquer une analyse de sensibilité exhaustive des résultats obtenus aux hypothèses adoptées pour les paramètres d'entrée. En effet, si l'on note P le nombre de paramètres qui déterminent le fonctionnement du modèle (et qui dans notre cas est bien supérieur au millier), il faudrait mener 2^P simulations pour tester les combinaisons paramétriques possibles seulement associées à la possibilité de prendre une seule valeur alternative pour chaque paramètre. Nous sommes donc conduits à ne *sélectionner* qu'un nombre réduit de variantes au scénario de référence qui correspondent à des combinaisons paramétriques alternatives dont nous pressentons qu'elles sont déterminantes quant à la forme des résultats obtenus dans le chapitre précédent.

Nous avons ainsi choisi, pour des raisons de simplicité de ne pas toucher au moteur de la croissance dans l'exploration des variantes au scénario de référence. En revanche, nous avons mené des analyses de sensibilité sur trois groupes de paramètres qui relèvent de l'univers matériel de la trajectoire et qui déterminent :

- La disponibilité des **ressources de pétrole** ;
- les **potentiels technologiques** d'efficacité énergétique des équipements utilisateurs d'énergie, en effectuant une distinction entre les équipements du secteur résidentiel, les véhicules particuliers, les poids lourds et les bus, et enfin l'amélioration autonome de l'efficacité énergétique dans les autres secteurs ;

- les choix relatifs aux **styles de développement**, avec une attention particulière aux questions de mobilité et de transport.

Dans tous les cas, nous avons effectué des choix paramétriques traduisant des hypothèses plus optimistes que celles adoptées dans la trajectoire de référence. Le fait d'avoir choisi de tester des hypothèses allant *a priori* vers un profil plus bas d'émission s'explique par le fait que nous soyons déjà sur une trajectoire haute des émissions par rapport à la majorité des travaux existants. Il serait tout aussi légitime de tester des hypothèses plus pessimistes. Mais cela n'apporterait rien à notre propos qui est essentiellement de faire apparaître des effets de système. Un récapitulatif des combinaisons paramétriques alternatives testées est fourni dans Tableau 15, à chacune de ces combinaisons correspond une simulation spécifique. Nous avons testé en plus trois trajectoires caractéristiques :

- une variante *« optimisme technologique »* qui résulte de la variation simultanée de tous les paramètres technologiques,
- une variante *« développement sobre en énergie »* pour la variation de tous les paramètres de la troisième catégorie,
- une variante *« sobriété et optimisme technologique »* pour la variation simultanée des paramètres *développement sobre et optimisme technologique*.

	Scénario	Hypothèses
Optimisme sur l'offre énergétique	*Optimisme sur les ressources de pétrole*	La valeur initiale des ressources de pétrole vaut 30% de plus que dans le scenario de référence
Optimisme sur les potentiels d'efficacité énergétique des équipements de demande finale	*Optimisme sur l'amélioration autonome de l'efficacité énergétique (AAEE)*	Les taux annuels d'amélioration autonome de l'efficacité énergétique sont multipliés par 1.5
	Optimisme sur l'évolution technologique des poids lourds et des bus	L'élasticité prix de l'intensité énergétique des véhicules est augmentée d'un tiers
	Optimisme sur les potentiels de gains technologiques pour les véhicules particuliers	Le taux d'apprentissage associé à chaque technologie est multiplié par 3
	Optimisme sur les progrès d'efficacité énergétique des équipements du secteur résidentiel	L'efficacité énergétique des équipements gagne progressivement 50% par rapport à la référence
Des styles de développement « sobres en énergie »	*Une croissance à faible contenu de fret*	L'intensité en transport de fret de la croissance décroît selon le scénario d'amélioration autonome de l'efficacité énergétique
	Une croissance à faible contenu matériel	Le niveau de saturation de la demande finale en bien industriels est diminué d'un tiers
	Une préférence des ménages pour l'équipement automobile plus faible	L'élasticité revenu du stock de véhicules particuliers est diminuée d'un tiers

Tableau 15 : Caractéristiques des variantes testées

2 Les conditions d'obtention d'un scénario de référence à « basses » émissions

Les variations de paramètres associées aux trois trajectoires caractéristiques (*« optimisme technologique », « développement sobre en énergie »* et *« sobriété et optimisme technologique »)* conduisent à des réductions non négligeables d'émission (Figure 47). L'ampleur de l'effet diffère cependant selon la variante et la période temporelle considérées.

Les réductions sont plus importantes en début de période et s'effectuent de façon plus régulière pour la variante *« optimisme technologique »*. Elles connaissent cependant après 2060 un phénomène de saturation. Au contraire, dans la variante *« développement sobre »*, l'essentiel des réductions d'émissions par rapport à la référence a lieu sur la période 2050-2075 ; la vitesse des

gains se ralentit ensuite sur le reste de la simulation. Ce décalage s'explique principalement par l'inertie des systèmes concernés par les variations des paramètres. La variante *« optimisme technologique »* qui touche l'efficacité des différents équipements consommateurs d'énergie est contrainte par la vitesse de renouvellement de ces équipements qui est bien supérieure à la vitesse d'évolution des infrastructures et des modes de localisation qui sont impactés par le déploiement de la variante *« développement sobre »*. Les réductions de la variante *« sobriété et optimisme technologique »* sont plus graduelles, mais ralentissent aussi en fin de période.

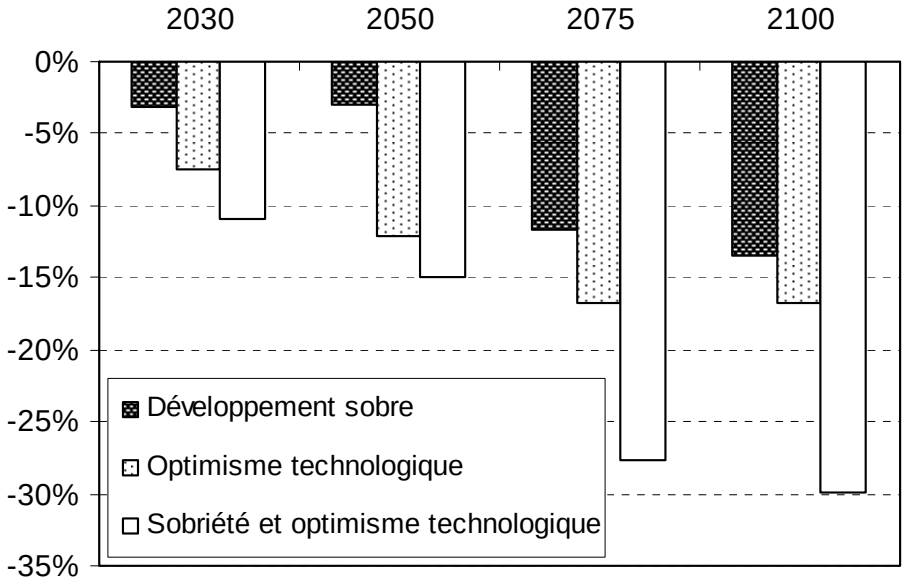


Figure 47 : Variation d'émission par rapport à la trajectoire de référence, sélection d'années et de variantes

Finalement, Les gains associés à la variante *« optimisme technologique »* se stabilisent à un niveau un peu supérieur à 16.5% alors que ceux de la variante *« développement sobre »* terminent à une valeur proche de 13.5% en 2100. Les variantes paramétriques testées ne conduisent donc pas à de réels changements de trajectoire d'émission et les résultats présentés dans le chapitre 4 sont robustes à des variations sur les hypothèses concernant les potentiels technologiques ou le contenu énergétique du développement économique.

La variante *« sobriété et optimisme technologique »* présente très normalement des réductions d'émissions beaucoup plus substantielles pour atteindre environ 30% de gain par rapport au scénario de référence en fin de période avec un niveau absolu égal à 29.9 GtC en 2100. Bien que ce niveau d'émission en fin de période reste au voisinage de la valeur la plus haute que l'on retrouve dans l'ensemble des quatre scénarios marqueurs de l'exercice SRES, ce travail pousse à penser que ni l'optimisme technologique, ni le choix de styles de développement plus sobres en énergie pris séparément ne peuvent permettre, en l'absence de politiques climatiques, de dévier d'une trajectoire fortement carbonée telle qu'elle a été présentée au chapitre 4. La combinaison de ces deux variantes qui correspond à un changement structurel de la croissance économique alliant progrès technologique sur les équipements et sobriété énergétique des modes d'organisation de l'activité peut conduire à des réductions substantielles d'émissions. Cependant, nous verrons dans la suite que la variante *« sobriété et optimisme technologique »* ne permet pas de modifier les mécanismes qui

se trouvent au fondement de la production d'une trajectoire haute en émissions, elle conduit en fait à limiter l'ampleur de leur réalisation.

L'examen, à plusieurs points du temps, des termes énergétiques de l'identité de Kaya associés aux variantes étudiées (Figure 48) montre que l'allure de ces courbes reste semblable à celle du scénario de référence quelle que soit la variante envisagée. Ceci confirme la robustesse du raisonnement que nous avons tenu dans le chapitre précédent (*cf.* chap. 4, section 4.2) et qui nous a conduit à identifier trois phases caractéristiques dans cette trajectoire.

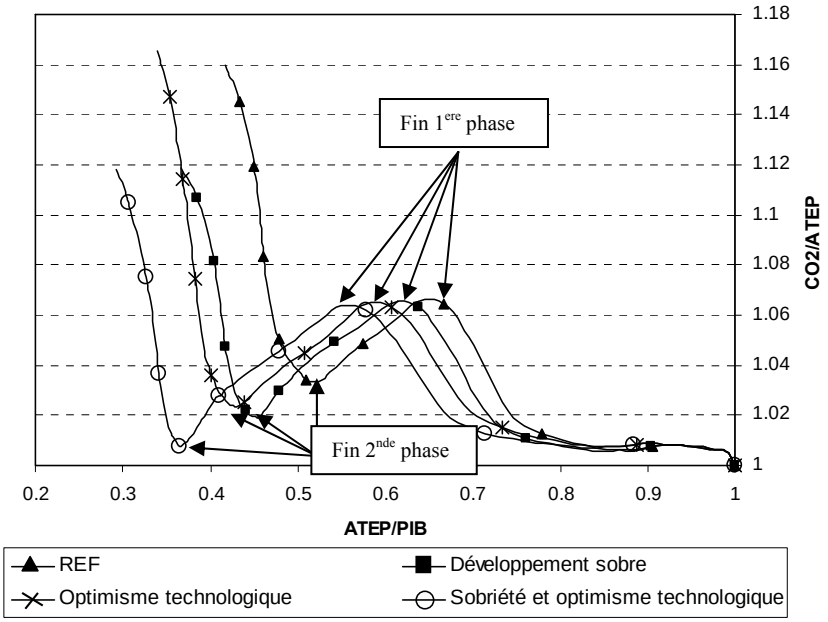


Figure 48 : Trajectoires du scénario de référence et des trois variantes sélectionnées dans l'espace intensité énergétique du PIB mondial – intensité carbone du système énergétique mondial
Les symboles marquent les décennies.

La **première phase** qui se termine avec la survenue des contraintes pesant sur la mise à disposition des ressources pétrolières, a une durée qui n'est pas modifiée dans les trois variantes testées. Dans les quatre scénarios, ces contraintes apparaissent en 2034. De même, l'intensité carbone du système énergétique à la fin de cette phase, est identique dans les quatre scénarios et correspond à une augmentation de 6.5% du contenu carbone de l'énergie primaire par rapport au début de la période, en 2001. En revanche, l'intensité énergétique du PIB mondial varie en fonction des variantes à la fin de cette phase, et la variante *« sobriété et optimisme technologique »* présente les écarts les plus importants par rapport à la référence qui sont de l'ordre de 15%. Les variantes testées ne sont donc pas à même d'éviter ou de décaler l'apparition des contraintes de déplétion qui apparaissent à moyen terme sur la production de pétrole. De même, l'intensification en carbone du système énergétique mondial, principalement due à l'utilisation massive des technologies charbon pour la production d'électricité, n'est pas remise en cause par nos tests paramétriques.

La **seconde phase** correspond à la période au cours de laquelle la hausse des prix du pétrole et du gaz induit des gains d'efficacité, une pénétration des biocarburants dans la production de carburants liquides et une augmentation de la part du nucléaire et des énergies renouvelables dans la génération d'électricité. Cette phase est caractérisée par une diminution simultanée de l'intensité

énergétique du PIB et de l'intensité carbone du système énergétique. L'ampleur des diminutions et la durée de cette phase diffèrent en fonction des scénarios : elle dure en effet 18 ans dans le scénario de référence, 3 ans de plus dans la variante *« optimisme technologique »*, 8 ans de plus dans la variante *« développement sobre »* et 12 ans de plus dans la variante *« sobriété et optimisme technologique »*. Au cours de cette phase, l'exploitation des potentiels d'amélioration technique du côté de la demande, et l'augmentation de la production de biocarburants du côté de l'offre, permettent de compenser la réduction de la production pétrolière sans engendrer une augmentation des prix à même de rendre la technologie de liquéfaction du charbon compétitive. Ainsi, moins une variante présente une demande de carburant liquide en croissance vigoureuse, plus les potentiels technologiques du côté de l'offre et de la demande ont le temps de se déployer pour compenser la déplétion pétrolière. Des préférences orientées vers un développement sobre en énergie que l'on retrouve dans les variantes *« développement sobre »* et *« sobriété et optimisme technologique »*, produisent une croissance moins intensive en transport, ce qui conduit finalement à une croissance de la consommation de carburants liquides moins vigoureuse que dans le scénario de référence et permet un allongement significatif de la durée de la seconde phase. A la fin de cette phase, la réduction de l'intensité carbone du système énergétique obtenue par rapport à la fin de la phase précédente dépend de la structure de la demande finale d'énergie et diffère donc sensiblement en fonction des variantes. En effet, moins la production de carburants liquides est importante, plus la part des biocarburants dans celle-ci sera élevée lorsqu'ils arrivent à la limite de leurs potentiels de production, c'est pourquoi les variantes *« développement sobre »* et *« sobriété et optimisme technologique »* présentent les baisses d'intensité carbone les plus importantes au cours de cette phase.

Aucune des variantes étudiées n'évite la survenue de la **troisième phase**. Même l'optimisme sur les potentiels technologiques et le choix d'un style de développement sobre en énergie ne permettent d'éviter la bifurcation vers un système énergétique reposant principalement sur l'utilisation du charbon qui confirme ainsi une importante réserve de compétitivité. En fonction du dynamisme de la consommation d'énergie du secteur des transports dans les différentes variantes, cette troisième phase est caractérisée par une augmentation plus ou moins importante de l'intensité carbone du système énergétique. Nous retrouvons ainsi l'augmentation la plus forte dans la variante *« optimisme technologique »* alors qu'elle reste plus modérée dans les deux autres variantes. En effet, les paramètres alternatifs associés à la variante *« développement sobre »* sont seuls à même de réduire l'intensité de la croissance économique en transport conduisant à une diminution, par rapport à la référence, de la production de carburants synthétiques en fin de période et donc de l'importance du charbon dans l'approvisionnement total en énergie primaire.

En fin de compte, les variantes paramétriques testées ne modifient pas l'enchaînement des dynamiques de système qui conduisent à l'obtention d'un scénario élevé en émission, elles permettent tout au plus de **retarder leur survenue**. En termes de niveau global d'émissions de CO_2, les variantes *« optimisme technologique »*, *« développement sobre »* et *« sobriété et optimisme technologique »* correspondent respectivement, en 2100, à un décalage de 13 ans, 11 ans et 23 ans par rapport à la trajectoire de référence.

3 Identification de mécanismes « tirant » la trajectoire d'émission vers le haut

L'étude des trois variantes permet de confirmer la robustesse des résultats obtenus dans le chapitre précédent. Cependant, il nous reste à identifier les mécanismes sous-jacents à l'origine de la production d'une trajectoire de référence intensive en carbone. La question ici est bien de déterminer si une trajectoire haute en émission est le produit d'une combinaison *particulière* de choix de paramètres dans leur intervalle d'incertitude ou bien le résultat de l'exercice de mécanismes endogènes agissant tels que des ressorts « tirant » la trajectoire d'émission vers le haut par le biais d'interactions entre :

- les potentiels de progrès technologique,
- les potentiels de croissance économique,
- les contraintes pesant sur la production des ressources non renouvelables,
- les préférences de consommation,
- les choix de localisation des activités et de styles de développement.

Utiliser la terminologie de potentiel n'est pas anodin ici puisque la structure de modélisation IMACLIM-R permet de formuler *ex ante* des hypothèses plus ou moins optimistes sur différents potentiels d'amélioration technologique mais dont la réalisation à l'intérieur des scénarios n'est pas automatique. Le résultat final obtenu dépend de l'interaction entre les potentiels ultimes d'amélioration et les conditions économiques qui permettent leur déploiement ; celui-ci peut s'avérer finalement partiel et les améliorations techniques observées *ex post* dans un scénario pourront être inférieures aux potentiels ultimes.

Dans ce cadre, les mécanismes que nous pouvons identifier comme étant à l'origine de la production d'une trajectoire haute en émission sont de deux types.

Les premiers correspondent à des interactions endogènes aux scénarios qui conduisent à **limiter la réalisation d'un potentiel sectoriel** donné de réduction des émissions. C'est ce que l'on retrouve par exemple dans le secteur des transports avec l'effet rebond : des gains accélérés d'efficacité sur les véhicules sont partiellement compensés par une hausse des kilomètres parcourus.

Les seconds concernent des **interactions négatives entre des hypothèses optimistes** formulées pour des secteurs différents qui mènent à obtenir une réduction d'émission associée à la somme des mesures inférieure à la somme des réductions obtenues pour chaque mesure. Ce concept de « sous additivité » des réductions d'émission renvoie à l'existence d'interactions endogènes entre les différents potentiels de réduction d'émission, d'origine technologique ou pas, qui conduisent à limiter leur réalisation respective.

La suite de ce chapitre est consacrée à la mise en lumière de certains de ces mécanismes qui sont au fondement de la production d'une trajectoire de référence intensive en émission. Raisonner pour cela dans le cadre d'une close *ceteris paribus* serait la solution idéale, mais le nombre de mécanismes qu'il conviendrait de « neutraliser » pour tester leur importance est tellement grand que nous nous heurterions aux limites des capacités calculatoires qui sont à notre disposition. Nous allons cependant exploiter le grand nombre de variantes paramétriques que nous avons exploré autour du scénario de référence et nous concentrer sur l'étude de quelques mécanismes clés.

3.1 Un développement sobre en énergie ralentit le rythme des gains d'efficacité énergétique

Nous avons adopté dans le modèle IMACLIM-R une représentation endogène du progrès technique qui utilise des courbes d'apprentissage pour les équipements du secteur énergétique et fait dépendre la réalisation des potentiels d'amélioration de la production cumulée de chaque technologie. Ce faisant, nous intégrons dans nos scénarios la possibilité d'un écart systématique entre le progrès technique potentiel et le progrès technique réalisé (qui a ici le même statut logique que l'écart entre la croissance potentielle et la croissance réelle en matière macro-économique). Pour chaque technologie, l'ampleur de cet écart dépend *in fine* de l'expérience qui est accumulée au cours de la trajectoire pour sa production. La réalisation du progrès technique potentiel pour une technologie dépend donc de deux effets déterminants :

- Un **effet de volume cumulé** qui conditionne la quantité, consommée à l'échelle de l'économie, du service énergétique que produit cette technologie. Cet effet détermine en fait la taille du marché sur lequel la technologie est susceptible d'entrer en compétition.
- Un **effet prix des énergies** dont dépend la compétitivité de la technologie et qui définit la part de marché qu'elle peut obtenir.

Dans ce cadre, un ralentissement du progrès technique, et donc un écart apparaissant entre le progrès technique potentiel et le progrès technique réalisé, peut apparaître *via* l'un de ces deux canaux. Cependant, la difficulté est que ces deux effets sont en partie liés dans la mesure où le niveau des prix de l'énergie joue sur le volume de service énergétique consommé ; toutefois ce dernier reste principalement déterminé par les dynamiques macroéconomiques qui fixent le niveau général de l'activité.

L'effet prix est particulièrement important dans nos scénarios dans la mesure où nous intégrons l'effet modérateur sur les prix des hydrocarbures qu'exerce le progrès technique lui-même. Dans ce cas, l'ampleur de l'écart entre le progrès technique potentiel et réalisé peut dépendre de plusieurs paramètres. Par exemple, notre formalisation des mécanismes de formation des prix du pétrole prend en compte, à côté des dynamiques de demande et des contraintes de rareté, l'ensemble des contraintes géologiques pesant sur la vitesse d'extraction des ressources. Plus ces contraintes sont fortes, plus rapidement la tension sur les prix va s'exercer et plus faible sera l'écart entre le progrès technique potentiel et le progrès réalisé. Inversement, si la demande de pétrole est réactive aux prix il peut s'opérer, lorsque les contraintes de déplétion s'appliquent, une adaptation sans heurt ni choc brutal sur les prix puisque le rythme de croissance de la demande redevient cohérent avec le rythme de la mise en production des pétroles non conventionnels et des biocarburants pour compenser l'épuisement de la production conventionnelle. Dans ce dernier cas, la hausse des prix de l'énergie est modérée et cela tend à accroître l'écart le entre progrès technique potentiel et le progrès technique réalisé.

L'effet « volume cumulé » lié à la quantité de chaque service énergétique consommée au cours d'une trajectoire conduit à des modifications de la vitesse du progrès technique en fonction des choix de styles de développement. Ainsi, une économie qui développe un système de transport favorisant le transport public aura une production de véhicules automobiles moins importante et donc des capacités d'apprentissage technologique plus faible qu'une autre économie misant sur le

développement du mode routier et ayant donc des capacités d'innovation dans ce secteur plus importantes.

Ces deux effets apparaissent tout particulièrement dans la variante *« sobriété et optimisme technologique »*, qui constitue un cas typique de non-réalisation endogène des potentiels d'amélioration technique.

Prise séparément, chaque variation de paramètre testée dans une des quatre variantes de la catégorie « optimisme sur les potentiels d'efficacité énergétique » (*cf.* Tableau 15), les autres paramètres restant constants, a certes un impact sur les trajectoires de prix des énergies, mais trop faible pour que le déploiement effectif de l'efficacité énergétique s'écarte notablement des potentiels.

En revanche, la variante *« sobriété et optimisme technologique »* combine une vision optimiste des potentiels d'efficacité, avec celle d'une mutation significative des styles de développement. Ceci se traduit par un écart important en matière de réalisation effective des potentiels d'amélioration technologique. Lorsque nous prenons l'exemple des véhicules particuliers, la Figure 49 illustre un résultat paradoxal selon lequel, tout en ayant adopté des hypothèses identiques pour les potentiels ultimes d'amélioration technique des véhicules dans les scénarios *« sobriété et optimisme technologique »* et « *optimisme technologique pour les véhicules particuliers* », l'efficacité moyenne de la flotte observée *ex post* est différente dans les deux scénarios. Nous retrouvons ici un cas typique qui démontre les limitations d'une démarche combinatoire pure pour construire des scénarios. En effet, les véhicules sont en moyenne moins efficaces dans la variante *« sobriété et optimisme technologique »* qui combine plusieurs hypothèses favorables à la diminution de l'intensité énergétique de la croissance, que dans celle « *optimisme technologique pour les véhicules particuliers* » où l'optimisme technologique se limite aux véhicules automobiles. Cette situation trouve son origine dans deux mécanismes principaux. Tout d'abord, malgré une courbe d'apprentissage associée aux véhicules efficaces identique dans les deux scénarios, nous retrouvons un apprentissage effectif plus lent lorsque l'optimisme technologique est étendu aux autres secteurs de l'économie et que les trajectoires de développement sont sobres en énergie. En effet, ces deux spécifications, en ralentissant la hausse des prix du pétrole et des autres énergies, diminuent par là même la pression pour effectuer des économies d'énergie et donc l'apprentissage concernant les véhicules les plus efficaces. De plus, les préférences des ménages sont orientées, dans le scénario *« sobriété et optimisme technologique »*, vers un système de transport moins dépendant à l'utilisation de l'automobile, ce qui conduit à une production de véhicules plus faible que dans l'autre scénario et donc à un ralentissement du processus d'apprentissage.

En fin de compte, les véhicules sont globalement moins efficaces dans la variante *« sobriété et optimisme technologique »* que dans celle « *optimisme technologique pour les véhicules particuliers* ». Ils peuvent être 10% moins efficaces sur de longues périodes et aller, à certaines dates, jusqu'à une efficacité inférieure de 18%. En définitive, la sobriété énergétique devient elle-même un facteur de ralentissement du progrès technique sur les technologies économes en énergie.

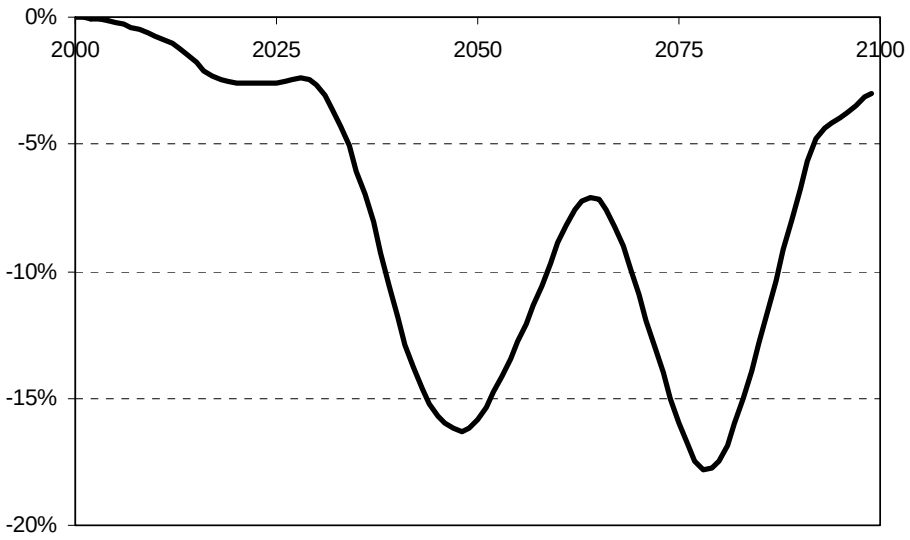


Figure 49 : Pertes d'efficacité moyenne pour la flotte mondiale de véhicules particuliers dans la variante *« sobriété et optimisme technologique »* par rapport à la variante « o*ptimisme sur les potentiels de gains technologiques pour les véhicules particuliers* »

3.2 Effet de « masque » du prix de l'énergie et risque de « *lock-in* » dans des trajectoires intensives en transport

La transition énergétique associée aux contraintes pesant sur l'exploitation des ressources pétrolières apparaît comme un phénomène déterminant pour la bifurcation de la trajectoire vers un scénario de référence haut en émissions car elle provoque un retour important du charbon dans l'approvisionnement total en énergie primaire. Dans ce contexte, le montant des ressources mondiales de pétrole brut disponibles en début de simulation prend une importance particulière car il va fortement déterminer la date de la survenue des premières contraintes. L'incertitude associée à ce montant a été largement soulignée dans la littérature (Rogner, 1997 ; Rherl et Friedrich, 2006). Les tenants de la thèse d'un « *peak oil* » à date rapprochée (Laherrere, 2003) sont aujourd'hui confortés aussi bien par les tensions actuelles sur les prix du pétrole que par les rumeurs de la révision à la baisse des réserves dans le Moyen-Orient. Cependant, même si la tendance structurelle à la hausse des prix du pétrole est indéniable, on ne saurait exclure une baisse des prix à moyen terme une fois relancé le cycle d'exploration interrompu depuis la fin des années 80. La réapparition d'une période de stabilisation sinon de hausse du ratio réserves sur production serait d'autant moins improbable qu'une stabilisation politique relative au Moyen-Orient et dans d'autres régions du monde permettrait de rééquilibrer géographiquement l'effort d'exploration en direction des zones où les chances de succès sont réellement plus importantes.

La valeur des ressources pétrolières ultimement récupérables que nous avons choisie dans notre scénario de référence correspond à la médiane des statistiques de l'USGS. Tester l'impact sur les émissions d'une valeur supérieure pour cette hypothèse permet de comprendre ce qui l'emporte entre les gains d'émission permis par la limitation du report technologique vers le charbon et en

sens inverse les émissions supplémentaires provenant de l'effet de prix plus bas des hydrocarbures sur la croissance économique, sur la consommation de services énergétiques et sur la vitesse de pénétration de technologies plus économes en énergie.

La variante *« optimisme sur les ressources de pétrole »* permet de quantifier l'impact sur le scénario de référence d'une augmentation de 30% du montant des ressources de pétrole brut disponibles en début de période. Par soucis de simplification, cette augmentation touche uniformément les ressources de chaque région du modèle et les différentes catégories de pétrole disponibles (conventionnel et non conventionnel). En termes d'émission, ce scénario ne diffère que faiblement de la trajectoire de référence avec un écart pour le montant cumulé qui augmente d'abord pour atteindre 1.4% de plus par rapport à la référence à l'horizon 2050 et diminue ensuite pour se stabiliser à 0.9% en dessous de la trajectoire de référence. L'impact de cette variante sur le profil temporel du prix du pétrole brut est pourtant loin d'être négligeable (Figure 50) avec un décalage de 20 ans dans l'atteinte du niveau des 90$ par baril, par exemple. En d'autres termes, les effets négatifs sur les émissions de ce décalage dans la montée des prix du pétrole sont plus que compensés par le moindre recours au charbon. Mais ce diagnostic, dans l'ensemble optimiste du point de vue strictement économique, doit être fortement nuancé parce qu'il a un coût en matière de trajectoire d'émission dont l'origine principale réside dans la dynamique du secteur des transports.

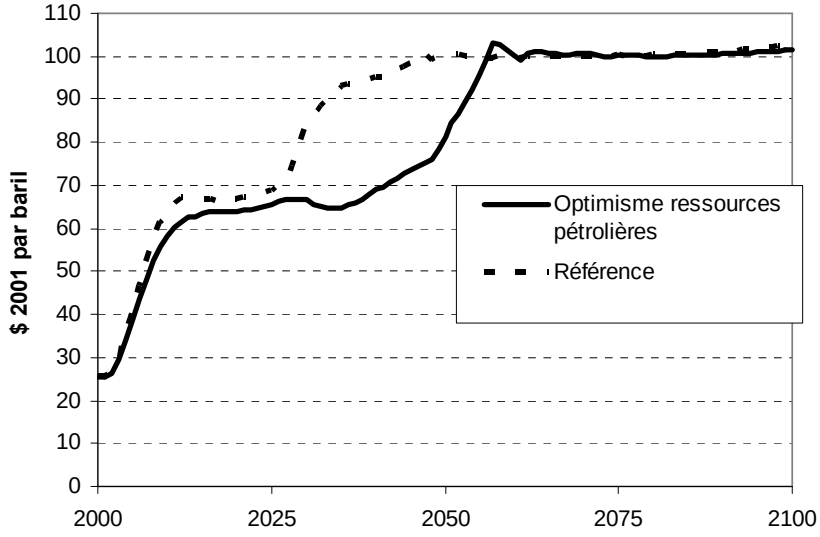


Figure 50 : Evolution du prix mondial du pétrole brut, sélection de variantes.

Lorsque l'on entre dans le détail sectoriel des émissions, on s'aperçoit que la modification, par rapport à la trajectoire de référence, des prix du pétrole sur la période 2001-2055 n'influence que faiblement le niveau d'émission des secteurs de l'agriculture, de l'industrie et des services (Figure 51). En effet, la consommation de pétrole dans ces secteurs suit déjà une dynamique de repli vers les usages captifs à des niveaux de prix proches de 70$ par baril, et l'impact de la limitation de l'augmentation du prix liée à des ressources plus abondantes reste limité. Le secteur électrique est plus touché *via* l'impact du prix du gaz sur le choix des technologies de production qui limite marginalement l'entrée des technologies charbon.

La principale conséquence d'une trajectoire de prix du pétrole plus basse concerne finalement le secteur des transports et la production de carburants liquides. On assiste en effet à une augmentation rapide des émissions de CO_2 du secteur des transports par rapport à la trajectoire de référence, qui culmine à +19% en 2040. Cette augmentation est due à des gains d'efficacité énergétique plus faibles sur les véhicules mais aussi à **l'intensification de la croissance en transport** par rapport à la référence, intensification qui est encouragée, tant pour les ménages que pour le système industriel, par l'efficacité accrue des infrastructures routières.

L'importance de ce mécanisme apparaît à partir de 2055 lorsque les trajectoires de prix du pétrole dans les deux scénarios ont atteint 100$ par baril, le niveau des émissions du transport dans la variante *« optimisme sur les ressources de pétrole »* redescend certes progressivement par rapport à la référence mais se stabilise à environ 5% au dessus de celle-ci. Cet **effet d'hystérèse** découle de l'apparition d'un phénomène de dépendance accrue du système économique au transport routier, du fait que, pendant cette période de 25 ans de blocage de la hausse des prix du pétrole, se mettent en place des infrastructures, des systèmes urbains et des modes d'aménagement du territoire qui ensuite, en raison de la longueur de leur temps caractéristique d'évolution vont introduire un effet de cliquet sur la consommation de transport (*lock-in*). Au final, le recours plus tardif à la production de carburants de synthèse à partir du charbon permet de contrebalancer, en termes d'émission cumulée, une part importante des émissions supplémentaires engendrées par l'effet « prix bas du pétrole » observé jusqu'en 2055. Cependant, nous aboutissons en fin de simulation à la création d'un système de consommation marqué par d'importants besoins de mobilité et un recours plus systématique au mode routier que dans le scénario de référence. Finalement, compte tenu des hypothèses technologiques adoptées dans ce scénario, cette situation débouche à long terme sur un recours accru et quasi irréversible au charbon.

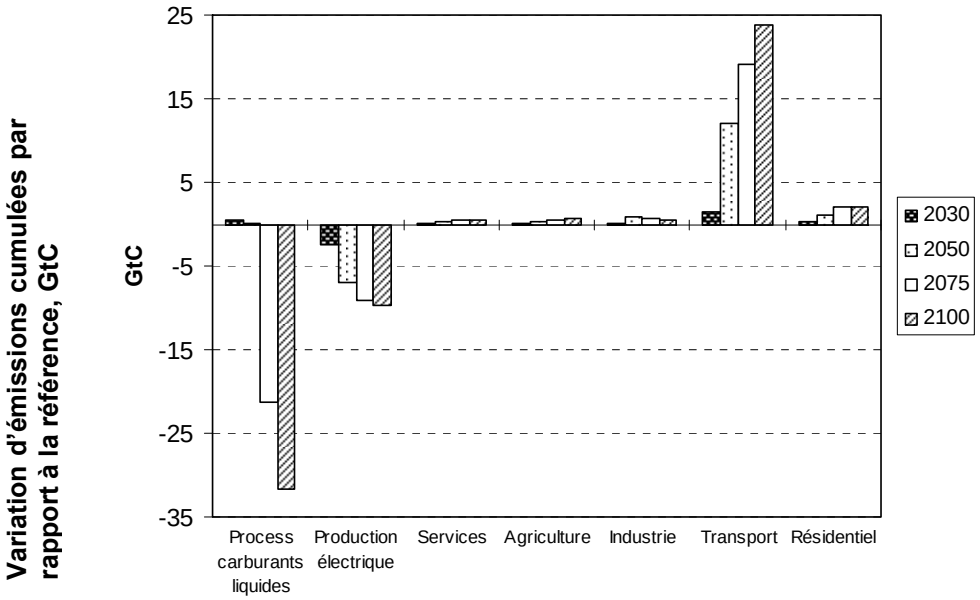


Figure 51 : Variations des émissions sectorielles cumulées entre le scénario *optimisme sur les ressources de pétrole* et la référence, sélection de dates

3.3 Effets rebond et réductions d'intensité énergétique

La quasi-totalité des variantes que nous avons testées mènent à évaluer les conséquences en termes de niveau d'émission d'une amélioration de l'efficacité énergétique de certains équipements ou d'une réduction de l'intensité de la croissance économique en certains services énergétiques. Au final, les gains d'émission obtenus par rapport à la référence dépendent bien sûr de l'ampleur de l'amélioration de l'efficacité énergétique ou de la décroissance de l'intensité énergétique mais aussi de la réaction de la demande finale et du niveau général de l'activité. Les mécanismes de réaction de ces deux dernières variables à des gains d'efficacité énergétique ou à des réductions de l'intensité énergétique de l'activité sont généralement regroupés sous l'appellation d'effet rebond.

L'avantage de disposer d'une modélisation hybride de l'économie réside dans la possibilité d'évaluer les rétroactions possibles entre l'évolution du secteur énergétique et l'**activité économique en général** mais aussi entre des améliorations technologiques propres à la production d'un service particulier et la **formation de la demande** pour celui-ci.

De plus, dans notre trajectoire de référence, les prix des énergies augmentent fortement. Dans un contexte de modélisation où les agents économiques effectuent leurs choix d'équipement sans anticiper parfaitement l'évolution future des prix, supposer des améliorations d'efficacité énergétique et des choix de styles de développement plus sobres en énergie diminue la contrainte subie par le système économique lors de l'augmentation des prix des énergies. L'ampleur des effets rebond risque d'être augmentée par cette situation particulière de contrainte.

3.3.1 Les différents types d'effet rebond

L'effet rebond correspond initialement à l'idée que les réductions de consommation énergétique attendues à la suite de gains d'efficacité énergétique peuvent être partiellement compensées par une hausse de la demande des services énergétiques dont le prix est réduit grâce à ces améliorations. Cependant Barker et *al.* (2007), reprenant les travaux de Greening et *al.* (2000), élargissent cette conception et proposent la distinction entre trois types d'effet rebond :

- **L'effet rebond direct** : les gains d'efficacité énergétique pour un service énergétique donné induisent une baisse du prix effectif de ce service, ce qui conduit à une augmentation de la demande pour ce service.
- **L'effet rebond indirect** : des gains d'efficacité énergétique induisent une baisse des dépenses énergétiques pour un consommateur donné. Cette baisse de dépense s'associe à une augmentation de son niveau de consommation pour d'autres biens dont la production requiert aussi des émissions de CO_2.
- **L'effet rebond global** : la baisse du prix des services énergétiques modifie les prix des biens intermédiaires et finaux dans l'ensemble de l'économie, ce qui conduit à un réajustement général en prix et en quantité pouvant mener à une croissance économique plus élevée, source de nouvelles émissions de CO_2.

Barker et *al.* (2007) rassemblent les deux derniers types d'effet rebond sous le terme d'effet rebond macroéconomique. Nous nous intéressons dans les deux sous-sections suivantes à la mesure des effets rebond sectoriels directs et macroéconomiques dans les variantes que nous avons testées.

3.3.2 Les effets rebond sectoriels directs

A priori les effets rebond sectoriels peuvent concerner tous les services énergétiques quel que soit l'agent économique qui les consomme. On les retrouve ainsi dans les secteurs industriels ou résidentiels mais ils sont particulièrement puissants dans la consommation de transport des ménages. Le mécanisme de base est très fortement lié à la spécification retenue dans IMACLIM-R pour la modélisation des transports. En effet, comme pour les autres secteurs, le progrès technique induit sur les véhicules conduit *in fine* à une hausse des coûts de transport inférieure à l'impact mécanique de l'augmentation des prix des énergies. Mais la dynamique des besoins de transport est encadrée non seulement par la contrainte budgétaire classique mais aussi par une contrainte de budget temps. Dès lors, une hausse de l'efficacité des infrastructures permet de se déplacer davantage tout en respectant cette contrainte, et ceci conduit à obtenir un effet rebond très significatif que l'on peut observer dans la variante « *optimisme sur les potentiels de gains technologiques pour les véhicules particuliers* ».

Dans un scénario où les gains d'efficacité énergétique sur les véhicules particuliers sont plus importants que dans la référence, nous pouvons effectuer une distinction entre les réductions d'émission *attendues* et les réductions *obtenues*. Nous assimilons les réductions *attendues* aux gains égaux à l'amélioration de l'efficacité énergétique par rapport à la référence. La Figure 52 illustre l'importance de l'effet rebond qui efface, *via* une augmentation des kilomètres parcourus, environ 25% des gains d'émissions techniquement permis par les améliorations technologiques. L'ordre de grandeur que nous obtenons pour ce phénomène est comparable à ce qui est empiriquement mesuré dans la littérature (Greening et *al.*, 2000). Derrière ce chiffre agrégé apparaissent des différences régionales et l'on retrouve une amplitude de l'effet rebond plus importante dans les régions non Annexe 1 qui sont dans une dynamique vigoureuse d'accès à la mobilité automobile. Ce phénomène est en revanche plus limité dans les régions économiquement les plus avancées puisque l'usage des véhicules particuliers y atteint un niveau proche de la saturation.

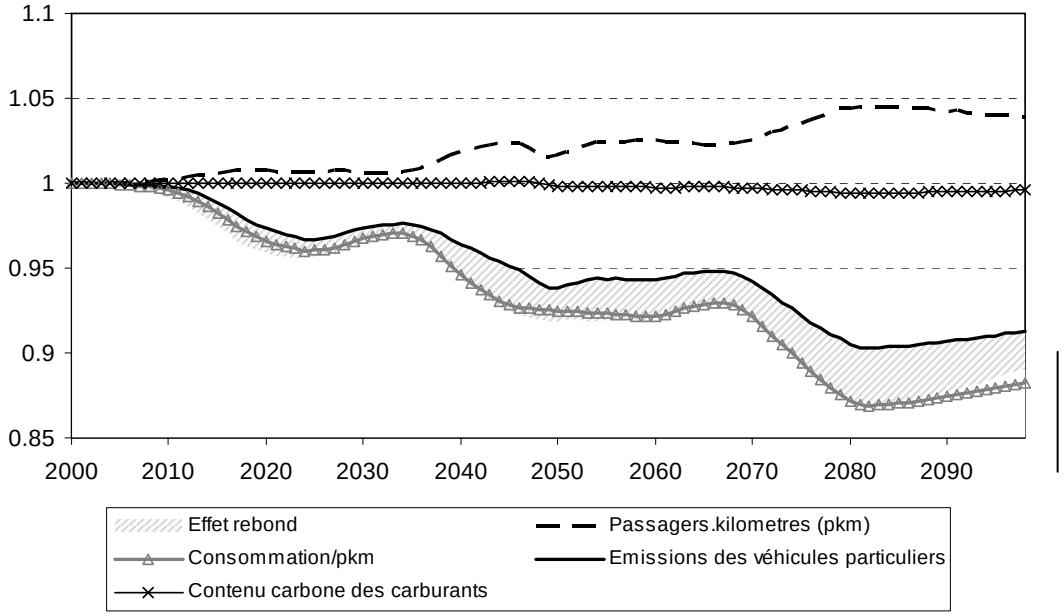


Figure 52 : Rapport entre les résultats obtenus dans la variante « *optimisme sur les potentiels de gains technologiques pour les véhicules particuliers* » et ceux obtenus dans la référence pour : La consommation moyenne mondiale du parc de véhicules particulier, les passagers.kilometres effectués avec le mode automobile à l'échelle mondiale, le contenu carbone moyen des carburants liquides, les émissions des véhicules particuliers.

En fin de compte, la prise en compte de l'effet rebond apparaît indispensable pour simuler des trajectoires de référence réalistes. Celui-ci contribue en effet à produire des trajectoires élevées en émissions dans la mesure où il compense, par effet de volume, une partie des améliorations technologiques qui peuvent être induites dans les scénarios. Cet effet est d'autant plus important dans le secteur du transport que la compétitivité des différents modes interagit avec l'aménagement du territoire et les décisions de localisation des agents économiques. Dans une période où les prix des carburants augmentent, les améliorations technologiques forment un effet de « masque » en amortissant cette hausse sur le prix final de la mobilité automobile. Cet effet de masque joue bien sûr, sur les agents privés qui sont d'une part conduits à mal anticiper le signal de la déplétion future de la production pétrolière qui leur est transmis par les marchés et qui d'autre part ne profitent pas complètement des améliorations technologiques disponibles pour réduire leur consommation. Mais il est renforcé par les décisions des pouvoirs publics et des gestionnaires d'infrastructures puisque la mobilité supplémentaire permise par l'accélération du progrès technique mène à effectuer des choix d'aménagement de long terme qui ne prennent pas suffisamment en compte les futures contraintes qui pèseront sur la production de pétrole. Ces conséquences de l'effet rebond pour la mobilité automobile, ignorées dans la plupart des structures de modélisation, sont ici prises en compte, et IMACLIM-R permet de montrer comment elles conduisent à orienter les choix d'infrastructures de transport dont l'inertie d'évolution est très importante. Ceci constitue un élément clé dans la compréhension des dynamiques qui conduisent à obtenir des trajectoires d'émissions très élevées.

3.3.3 Les effets rebond macroéconomiques

L'évaluation de l'importance de l'effet rebond macroéconomique diffère des effets rebond sectoriels. En effet, dans le premier cas et contrairement au second, nous ne pouvons pas calculer, pour certaines variations de paramètres, la réduction « attendue » d'émission pour la comparer à la réduction obtenue. Cependant, pour les trois variantes testées, nous pouvons nous intéresser à la variation d'activité que ces variantes présentent par rapport à la trajectoire de référence pour quantifier l'ampleur de l'effet rebond macroéconomique. Nous pouvons ainsi observer, sur la Figure 53, que des effets importants de rétroaction sur le PIB existent lorsque l'on teste des hypothèses d'augmentation des potentiels d'efficacité énergétique ou d'orientation vers des styles de développement moins intensifs en énergie. Ces effets de rétroactions sont positifs et compensent donc partiellement, par une activité économique plus importante, les réductions d'émissions provenant des choix d'hypothèses plus optimistes qui ont été effectués dans ces variantes.

Les variantes paramétriques qui sont testées mènent, par rapport à la trajectoire de référence, à diminuer l'intensité énergétique de l'activité économique ou de la consommation des ménages. La part du budget des ménages consacrée aux dépenses énergétiques se trouve diminuée dans ces scénarios, ce qui permet d'augmenter la consommation des biens non énergétiques. Les secteurs productifs voient dans le même temps diminuer leurs coûts de production relatifs à l'énergie et au transport et augmentent donc leur productivité. Une trajectoire de croissance qui présente une consommation moindre d'énergie permet aussi d'éviter certains investissements dans les capacités productives des secteurs énergétiques et libère donc du capital qui peut être investi dans les autres secteurs de l'économie, améliorant ainsi leur productivité. Les effets vertueux d'une intensité énergétique diminuée conduisent globalement à une croissance plus importante même si certaines régions sont affectées négativement, comme celles qui sont exportatrices de ressources fossiles.

L'augmentation de l'activité par rapport au scénario de référence peut ainsi atteindre, à l'échelle mondiale, près de 4% en fin de période pour la variante *« sobriété et optimisme technologique »*. L'effet d'accélération de la croissance est plus important dans la variante *« développement sobre »* (2.5% de gain en 2100) que dans la variante *« optimisme technologique »* (1.5% de gain en 2100). C'est en fait sur la période 2060-2100 que les gains d'activité deviennent plus importants dans la variante *« développement sobre »* que dans la variante *« optimisme technologique »*. C'est en effet dans la première variante que la dépendance des économies à la consommation de transport est la plus fortement réduite, et c'est ce qui permet de lever, à long terme, une contrainte qui pèse sur le déploiement de la croissance. Ceci constitue un bon exemple de possibilités de tuilage temporel entre variables technologiques et actions sur les styles de développement.

Entre 2030 et 2060 chacune des trois variantes connaît une accélération sensible de la croissance par rapport à la trajectoire de référence qui est suivie par une période de rattrapage relatif. La longueur de cette période caractéristique diffère en fonction des variantes, mais dans tous les cas ces mécanismes donnent aux courbes une allure « en cloche » sur cette période. Ce phénomène d'accélération transitoire survient au moment où les premières contraintes s'appliquent sur la production pétrolière et où s'amorce la transition énergétique vers un système énergétique qui n'est plus fondé sur l'utilisation du pétrole. Les variantes testées rendent cette transition énergétique moins brutale que dans le scénario de référence, en même temps que les économies deviennent plus résilientes à l'augmentation des prix des énergies. La conjonction de ces deux faits induit finalement

un ralentissement de la croissance, au cours de cette période, beaucoup moins important que celui que l'on retrouve dans le scénario de référence.

En définitive, ces résultats confirment la nécessité de ne pas raisonner à trajectoire économique constante lorsque l'on veut tester les effets de telle ou telle amélioration technologique au voisinage d'une trajectoire de référence donnée. De plus, ils soulignent l'importance des effets rebond macroéconomiques et le rôle qu'ils peuvent avoir dans les mécanismes de production d'une trajectoire haute en émissions dans la mesure où ils compensent partiellement, par effet de volume, les réductions de l'intensité énergétique de la croissance. Et, dans notre cas, les émissions supplémentaires provoquées par l'effet rebond macroéconomique atteignent, en cumulé sur tout la trajectoire, jusqu'à 42 GtC dans le scénario « *sobriété et optimisme technologique* ».

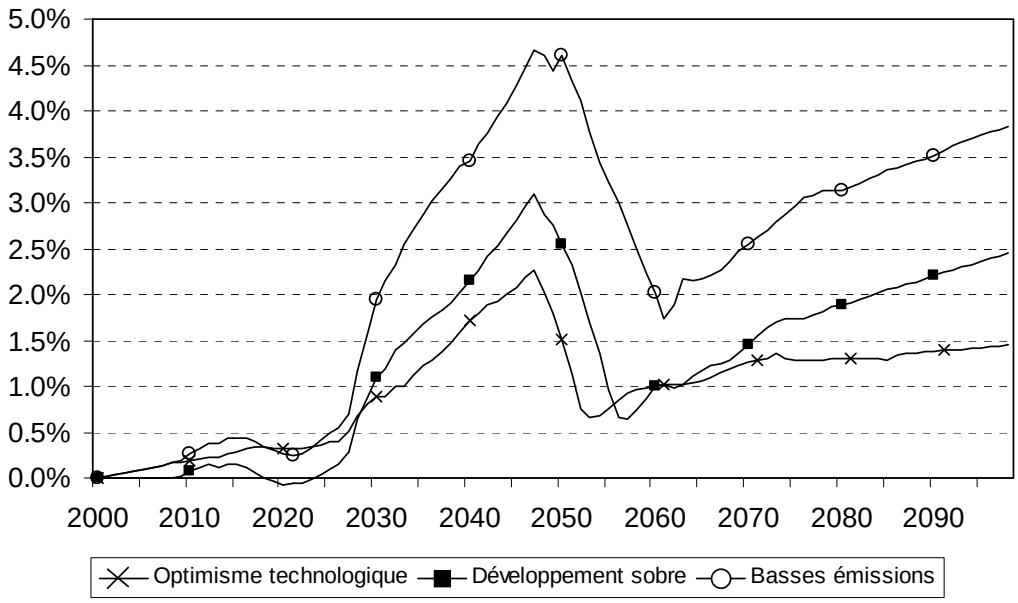


Figure 53 : Variation du PIB mondial par rapport au scénario de référence, sélection de variantes.

Conclusion

La première conclusion que l'on peut tirer des résultats obtenus pour notre trajectoire de référence est que des risques importants existent, en cas de non-action, de bifurquer vers des trajectoires de croissance très intensives en carbone.

Ce résultat découle principalement de la prise en compte, dans notre structure de modélisation, de mécanismes qui étaient jusqu'à présent généralement négligés. Ces mécanismes découlent d'interactions endogènes, dans un cadre d'équilibre général, entre les styles de consommation des agents, les potentiels d'amélioration technologique et les modes de localisation. Parmi ces mécanismes, nous pouvons distinguer les effets de système qui visent à limiter, par interactions négatives réciproques, la réalisation simultanée de plusieurs potentiels sectoriels de réduction d'émission. Nous pouvons aussi identifier des dynamiques endogènes conduisant à limiter la réalisation de certains potentiels de progrès technologiques.

Une trajectoire élevée en émission n'est donc pas, dans notre cas, le résultat d'une combinaison d'hypothèses pessimistes mais le fruit d'interactions endogènes au fonctionnement du modèle.

Du point de vue de la décision politique, ces résultats concernent tout d'abord les analyses coûts/bénéfices menées pour décider de l'ampleur de l'action de réduction des émissions. En effet, nous démontrons que des risques importants de bifurcation vers des trajectoires d'émissions très élevées existent, trajectoires qui présenteraient des coûts très importants associés aux dommages du changement climatique.

Du côté des politiques de réductions cette fois, il y a fort à penser que les mécanismes endogènes qui « tirent », dans la référence, la trajectoire d'émission vers le haut, continueront d'opérer lorsque l'on envoie aux économies un signal de décarbonisation et ils peuvent mener à compliquer le processus de diminution des émissions. Nous abordons ce problème dans le chapitre suivant qui est dédié à l'étude des politiques climatiques dans un cadre de changement structurel endogène.

Bibliographie

Barker, T.S., Ekins, P., Foxon, T., 2007, “The macro-economic rebound effect and the UK economy”, *Energy Policy*, 35, pp.4935-4946.

Greening, L., Greene, D.L., Difiglio, C., 2000, “Energy efficiency and consumption the rebound effect—a survey”. *Energy Policy*, 28, pp. 389-401.

Laherrère, J.H., 2003, “Future of oil supplies”, http://www.oilcrisis.com/laherrere/zurich.pdf.

Rehrl T., Friedrich R., 2006, Modelling long-term oil price and extraction with a Hubbert approach: The LOPEX model, *Energy Policy*, 34(15) , pp. 2413-2428.

Rogner, H., 1997, “An assessment of world hydrocarbon resources”, *Annual Review of Energy and the Environment,* 22, pp. 217-262.

Chapitre 6

Changement structurel induit et scénarios de stabilisation

Table des matières

1 QUELQUES PRECISIONS METHODOLOGIQUES 220

1.1 DEFINITION DES OBJECTIFS DE STABILISATION 220
1.2 QUELLES SPECIFICATIONS POUR LE PROGRES TECHNIQUE ? 221
1.3 TRAJECTOIRES DE REDUCTION DES EMISSIONS ET SIGNAL DE DECARBONISATION 222

2 UN SCENARIO DE STABILISATION A 450 PPMV AVEC CHANGEMENT TECHNIQUE INDUIT DANS LE SECTEUR ENERGETIQUE 223

2.1 VALEUR DU CARBONE : DES PRIX SUPERIEURS A CEUX OBTENUS DANS LA LITTERATURE 223
2.2 DEVELOPPEMENT ENERGETIQUE SOUS CONTRAINTE CARBONE 225

3 CHANGEMENT TECHNIQUE ENDOGENE ET COUT DE STABILISATION 230

3.1 L'INDUCTION DU CHANGEMENT TECHNIQUE PERMET DE REDUIRE LES COUTS 230
3.1.1 Pourquoi l'induction du changement technique réduit le niveau de la taxe ? 234
3.1.2 L'induction du changement technique réduit les dépenses énergétiques de décarbonisation 238
3.2 COUTS MACROECONOMIQUES : UNE MAUVAISE SURPRISE LIEE A LA REPRESENTATION ENDOGENE DE LA CROISSANCE ? 240

4 CHANGEMENT STRUCTUREL INDUIT ET POLITIQUES CLIMATIQUES 245

4.1 AU-DELA DE LA TAXE CARBONE 246
4.1.1 Un signal à l'efficacité marginale décroissante 246
4.1.2 Le secteur des transports comme un point de blocage à la décarbonisation 247
4.2 POUR UNE VISION ELARGIE DU CHANGEMENT STRUCTUREL 250
4.2.1 Stabilisation climatique et politiques d'infrastructures 250
4.2.2 Multiplication des signaux et coût de la stabilisation 252

CONCLUSION 258

BIBLIOGRAPHIE 260

Les deux chapitres précédents ont démontré l'existence de rétroactions spécifiques liées à une représentation endogène du changement technique qui constituent des forces de rappel importantes vers des trajectoires de référence présentant des niveaux élevés d'émission.

En abordant dans ce chapitre l'analyse des scénarios visant à limiter l'élévation des concentrations atmosphériques de CO_2 en fonction d'un objectif de stabilisation donné, nous cherchons à déterminer dans quelle mesure, et pour quelle raison, traiter le changement technique comme induit par l'ensemble des mécanismes économiques ou bien comme résultant de processus autonomes change la conception que l'on a des politiques climatiques.

Historiquement, la vision autonome du progrès technique a été accusée à la fois pour son manque de réalisme et parce que les conclusions qu'elle fournissait tendaient à surévaluer les coûts des politiques et à négliger les bénéfices d'une action précoce. Considérer que les politiques climatiques peuvent influer sur l'orientation du progrès technique a ainsi conduit à réviser à la baisse les évaluations des coûts de ces politiques et à modifier les recommandations formulées quant au tempo optimal de l'action. Cependant, nous avons souligné dans le premier chapitre que le débat entre progrès technique induit et autonome était caractérisé par un certain nombre de confusions susceptibles d'influer fortement sur les résultats obtenus.

Dans ce chapitre, nous revisitons ce débat en prenant en compte les spécifications nouvelles présentées dans le premier chapitre. Celles-ci réévaluent **l'importance du phénomène d'éviction** (« *crowding-out effect* ») dans un cadre de croissance endogène et prennent en compte, dans les scénarios, des interactions entre **l'induction du progrès technique et l'induction du changement structurel** par les politiques climatiques. Les résultats obtenus pour cet exercice diffèrent fortement de ceux que l'on trouve dans la littérature, lorsque l'induction du progrès technique ne concerne que le secteur énergétique. Nous nous attachons, dans ce qui suit, à étudier les paramètres importants qui les déterminent.

Cependant, nous nous plaçons dans un premier temps, pour construire un scénario central de stabilisation, dans le cadre le plus commun d'endogénéisation du progrès technique : lorsqu'il ne concerne que les technologies du secteur énergétique. Cet exercice donne la possibilité d'effectuer une première comparaison entre un traitement autonome et endogène du changement technique dans un cadre proche de celui communément adopté dans la littérature à la seule différence qu'ici, l'induction du changement technique interagit avec la formation de la demande finale et les modes de localisation des activités. Ce travail permet en même temps de présenter en détail le contenu énergétique d'un de nos scénarios de stabilisation et de comparer les modes de formation des coûts d'une politique de stabilisation selon que le traitement du changement technique est endogène ou exogène.

Avant d'aller plus en avant et de présenter des résultats chiffrés, il est nécessaire de revenir dans une première section sur quelques définitions et précisions méthodologiques. Dans cette partie, nous présentons donc successivement les différents objectifs de stabilisation choisis pour nos scénarios puis, les enjeux méthodologiques liés à la production de scénarios comparables avec une représentation autonome ou induite du progrès technique. Le type de signal de décarbonisation qui est envoyé aux économies dans cet exercice sera abordé dans un dernier temps.

1 Quelques précisions méthodologiques

1.1 Définition des objectifs de stabilisation

Nous considérons dans ce chapitre deux objectifs différents de stabilisation de la concentration atmosphérique de CO_2 en excluant les autres gaz à effet de serre. Ces deux niveaux sont respectivement égaux à 450 ppmv et 550 ppmv.

Les scénarios de stabilisation de la concentration atmosphérique du seul CO_2 à **550 ppmv** ont reçu une attention importante dans la littérature (Weyant, 2004 ; Grubb et *al.* 2006). Cet objectif conduit à des concentrations proches de 650 ppmv équivalent CO_2 lorsque l'on prend en compte les autres gaz à effet de serre. Situé dans la fourchette de 590 à 710 ppmv équivalent CO_2, ce niveau de concentration conduit (*cf.* Tableau 16) à des augmentations de température moyenne comprises entre 3.2 et 4°C. Beaucoup moins ambitieux en termes de limitation du changement climatique que l'objectif 450 ppmv, les scénarios 550 ppmv étudient la mise en place d'une action de mitigation des émissions moins radicale et dont le lancement peut encore être repoussé de quelques années.

Les scénarios de stabilisation à **450 ppmv** de CO_2 correspondent approximativement à un niveau de stabilisation à 500 ppmv équivalent CO_2 lorsqu'on prend en compte les politiques de réduction qui sont appliquées aux autres gaz à effet de serre (et qui ne sont pas traitées dans le modèle) (Grubb et *al.*, 2006). Du point de vue de la limitation du changement climatique, les travaux du groupe 3 du GIEC (*cf.* Tableau 16) concluent à une augmentation de la température moyenne entre 2 et 2.4°C par rapport au niveau préindustriel en cas de stabilisation à des niveaux de concentration situés entre 435 et 490 ppmv équivalent CO_2. Un objectif de stabilisation à 450 ppmv pour le seul CO_2 correspond donc à un niveau de contrainte légèrement au dessus de ce qu'il faudrait atteindre pour obtenir une limitation de l'augmentation des températures moyennes à 2.4°C par rapport au niveau préindustriel.

Le lecteur doit toutefois être conscient que l'objectif de stabilisation à 450 ppmv est *au dessus* de l'objectif, adopté par la Commission Européenne, de limitation du changement climatique à une augmentation des températures moyennes inférieure à 2°C par rapport à l'ère préindustrielle. La réalisation de cet objectif nécessiterait une stabilisation des concentrations de CO_2 à un niveau proche de 400 ppmv (*cf.* Tableau 16).

Même si des résultats pour des scénarios de stabilisation à 550 ppmv seront également présentés dans les sections 3 et 4 de ce chapitre, nous avons décidé de choisir l'objectif à 450 ppmv pour détailler, dans la section suivante, un scénario de stabilisation. Ce choix procède de la volonté de relater précisément le contenu énergétique d'un scénario conduisant à une limitation ambitieuse du changement climatique.

Forçage radiatif additionnel (W/m^2)	Concentration atmosphérique de CO_2 (ppmv)	Concentration atmosphérique de tous les gaz à effet de serre (ppmv équivalent CO_2)	Augmentation de la température moyenne globale par rapport au niveau préindustriel, à l'équilibre (°C)
2.5-3.0	350-400	445-490	2.0-2.4
3.0-3.5	400-440	490-535	2.4-2.8
3.5-4.0	440-485	535-590	2.8-3.2
4.0-5.0	485-570	590-710	3.2-4.0
5.0-6.0	570-660	710-855	4.0-4.9
6.0-7.5	660-790	855-1130	4.9-6.1

Tableau 16 : Lien entre différentes métriques pour définir un objectif de stabilisation (adapté de Fisher et *al.* (2007), tableau 3.5 p.198)

1.2 Quelles spécifications pour le progrès technique ?

Selon les spécifications décrites dans les chapitres deux et trois, il est possible, dans le modèle IMACLIM-R, d'adopter une représentation endogène du progrès technique pour les technologies du secteur énergétique et pour l'évolution de la productivité du travail dans les autres secteurs de l'économie.

Nous avons choisi de limiter dans un premier temps l'impact de l'induction du changement technique par les politiques climatiques **au seul secteur énergétique**. Cette famille de scénarios est dénommée dans la suite *ETC (Endogenous Technical Change)* et nous la comparons à une autre famille de scénarios, simulée avec une représentation autonome du progrès technique qui est notée *ATC (Autonomous Technical Change)*.

Nous reviendrons dans la troisième section de ce chapitre sur l'étude des politiques de mitigation dans un cadre alliant une représentation endogène simultanée de la croissance et du progrès technique dans le secteur de l'énergie.

Enjeux méthodologiques pour une comparaison des modes de traitement du progrès technique

Les scénarios *ATC* supposent que les politiques climatiques ne peuvent modifier ni le rythme ni la direction du progrès technique alors qu'elles le peuvent dans les scénarios *ETC*. Une condition préalable à la comparaison de plusieurs modes de traitement du changement technique est de garantir qu'ils conduisent à la même trajectoire de référence. Pour cela, nous avons simulé la trajectoire de référence (présentée dans le chapitre 4) dans le cadre le plus général de changement technique endogène disponible dans IMACLIM-R. L'évolution des paramètres qui sont concernés par la description endogène du changement technique a été alors figée pour être incorporée de façon exogène dans les scénarios de stabilisation avec changement technique autonome (*ATC*). Dans ces scénarios, le progrès technique suit donc au cours du temps une trajectoire exogène égale à celle obtenue dans le scénario de référence, et les politiques climatiques ne pourront modifier ni son rythme ni sa direction.

Dans les scénarios de stabilisation *avec* changement technique endogène (*ETC*), au contraire, les fonctions qui endogénéisent les changements techniques restent opérantes et donnent donc la possibilité aux politiques climatiques d'induire d'autres itinéraires techniques que ceux obtenus dans le scénario de référence.

1.3 Trajectoires de réduction des émissions et signal de décarbonisation

Le signal permettant la réduction des émissions de CO_2 dans le modèle IMACLIM-R est une taxe carbone et nous prenons la liberté dans ce qui suit d'employer parfois l'expression « prix du carbone » pour désigner le niveau de la taxe. Pour cet exercice, les politiques climatiques débutent en 2010 et face à une mise en œuvre rapide des politiques carbones, la valeur de la taxe carbone n'est pas identique en fonction des régions pour prendre en compte les délais d'ajustements laissés aux pays non Annexe 1. Ce délai se traduit par un niveau de taxe inférieur dans ces régions par rapport aux pays de l'Annexe 1 et cette différence persiste pendant toute la période de simulation.

IMACLIM-R ne calcule pas de trajectoire optimale de réduction des émissions de CO_2 face à un objectif de stabilisation des concentrations donné. Pour chaque objectif de stabilisation, nous avons construit des trajectoires de réduction moyennes à partir des résultats obtenus par les différents modèles de l'exercice IMCP (Grubb et *al.* 2006). Ces trajectoires présentent des budgets d'émission sur le siècle égaux à la moyenne de ceux obtenus dans l'exercice IMCP et qui valent respectivement 600 GtC et 930 GtC, pour les scénarios 450 ppmv et 550 ppmv (Figure 54). L'objectif de stabilisation à 450 ppmv nécessite une action précoce qui conduit à un pic des émissions mondiales dans les années 2020. Cette contrainte est partiellement relâchée pour l'objectif 550 ppmv, où le pic des émissions doit être atteint dans les années 2040.

Un Planificateur bienveillant imposerait sans doute une trajectoire de réduction différente selon que l'on considère que le progrès technique est ou n'est pas induit par les politiques climatiques. En effet, dans un cadre de progrès technique endogène, si l'on veut profiter pleinement des effets d'apprentissage sur le long terme, il conviendrait d'adopter une action d'abattement plus forte sur le court terme que dans un cadre autonome. En fait, l'arbitrage est difficile dans la mesure où il convient de mettre en balance cet avantage avec les coûts d'une dévalorisation prématurée du capital existant. Cependant, ce qui importe dans cette thèse est la compréhension de ce qui sépare les conceptions endogènes ou autonomes du progrès technique en matière de formation des coûts macro-économiques. Dès lors, il convient d'éliminer toute interférence avec la question pourtant légitime du profil temporel optimal de l'effort d'abattement, ce qui nous a conduit à prendre le même profil de réduction dans tous les scénarios.

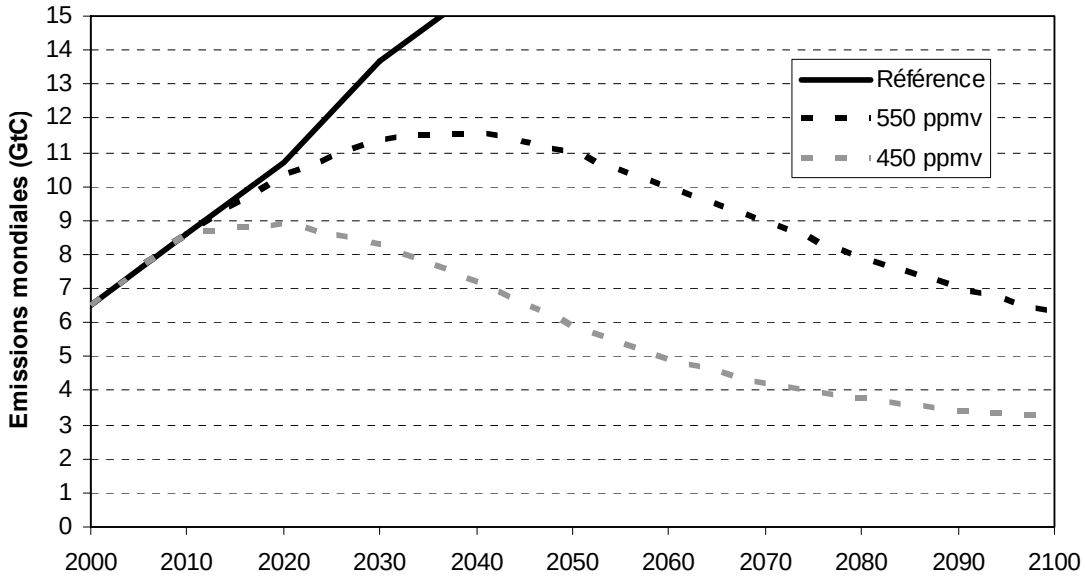


Figure 54 : Trajectoire des émissions mondiales sur la période 2000-2100 pour le scénario de référence et les scénarios de stabilisation à 550 et 450 ppmv

Les profils de taxe adoptés sont linéaires par morceau avec un point défini à chaque décennie. Les scénarios de stabilisation sont obtenus par tâtonnement sur le niveau de la taxe à chaque décennie avec, pour chaque scénario, un critère d'arrêt du tâtonnement portant sur l'écart entre la trajectoire d'émission effectivement obtenue dans le modèle et la trajectoire d'émission relative à l'objectif de stabilisation visé (que l'on retrouve, pour chaque objectif, dans la Figure 54).

2 Un scénario de stabilisation à 450 ppmv avec changement technique induit dans le secteur énergétique

Nous présentons dans les sous-sections suivantes le détail énergétique d'un scénario de stabilisation à 450 ppmv avec une **représentation endogène du progrès technique pour le secteur énergétique**. Les spécifications endogènes relatives au secteur énergétique qui sont décrites dans le troisième chapitre de cette thèse, sont donc complètement opérantes dans ce scénario que nous notons *ETC 450* ppmv. L'objectif des sous-sections suivantes est d'étudier comment les politiques climatiques peuvent induire des itinéraires techniques différents de ceux observés dans le scénario de référence et présentés dans le quatrième chapitre. Nous reviendrons sur l'évaluation du coût de ce scénario dans la section 3 de ce chapitre.

2.1 Valeur du carbone : des prix supérieurs à ceux obtenus dans la littérature

La Figure 55 reproduit le niveau de taxe requis pour obtenir le scénario *ETC 450 ppmv*. Ces valeurs sont globalement plus élevées que ce que l'on trouve généralement dans la littérature, et le

GIEC fournit pour le même objectif de stabilisation des valeurs du carbone comprises, en fonction des modèles, entre 18 et 79 $/tCO$_2$ en 2030, puis entre 30 et 155 $/tCO$_2$ en 2050 en enfin entre 35 et 350 $/tCO$_2$ en 2100 (Fisher et *al.*, 2007, p.206). Nous reviendrons plus loin dans ce chapitre sur l'explication de ces différences et sur l'analyse du profil de taxe obtenu, mais il convient d'ores et déjà d'interpréter les valeurs du carbone obtenues avec précaution :

- La trajectoire de réduction des émissions adoptée pour cet objectif n'est pas optimale et un autre profil permettrait sûrement de diminuer la valeur donnée au carbone à l'horizon 2030 ;
- ces valeurs correspondent au signal marginal à imposer aux secteurs où les réductions sont les plus difficiles à obtenir et non au coût moyen des réductions.

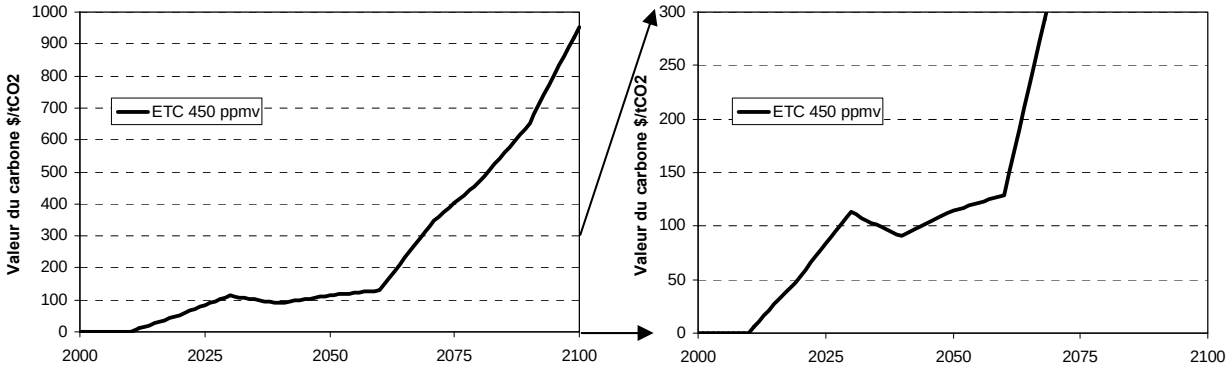


Figure 55 : Valeur du carbone dans le scénario *ETC* 450 ppmv sur la période 2001-2100 (graphe de gauche), zoom de la même trajectoire sur les valeurs du carbone inférieures à 300 $/tCO$_2$ (graphe de droite)

Il est légitime que le lecteur reste, au premier abord, dubitatif quant au réalisme de tels niveaux de taxe qui approchent les 1000 $/tCO$_2$ en 2100. Pour l'encourager à poursuivre sa lecture nous pouvons cependant apporter ici quelques remarques :

Tout d'abord, l'objectif de stabilisation à 450 ppmv est très exigeant et cette taxe carbone imposée à l'économie permet de réduire les émissions de 1346 GtC par rapport à la trajectoire de référence sur la période 2001-2100. L'importance de l'effort à concéder pour atteindre l'objectif de stabilisation des concentrations à 450 ppmv est à mettre en regard du niveau initialement très élevé des émissions dans la trajectoire de référence. Le pic des émissions mondiales est atteint dans ce scénario en 2019 pour une valeur annuelle de 8.9 GtC. Compte tenu des différences régionales dans le niveau de la taxe et les dynamiques de croissance, le pic des émissions au cours du XXI^{eme} siècle est atteint cinq ans plus tôt pour l'Annexe 1 et quinze ans plus tard pour les régions non Annexe 1. A titre de comparaison, un objectif de stabilisation à 550 ppmv qui est beaucoup moins exigeant nécessiterait d'atteindre le pic mondial des émissions en 2040 pour une valeur annuelle de 11.6 GtC.

Ensuite, l'impact économique réel de ces niveaux de taxe très élevés dépend *in fine* du contenu carbone de la consommation d'énergie et du niveau général de la richesse au moment où ils sont imposés. Si, à titre d'exemple, nous nous intéressons à l'évolution de la part du budget des ménages qui est allouée aux achats d'énergie et de services de transport, nous pouvons constater que de telles valeurs du carbone ne provoquent pas, en fin de période de modification irréaliste de

ces parts de budget : la part moyenne, à l'échelle mondiale, du budget des ménages allouée à ces dépenses passe en effet d'une valeur de 8.4% en 2001 à une valeur de 11.1% en 2100.

Enfin, il faut reconnaître dans ces résultats la réalisation du mécanisme décrit par Ghersi et Hourcade (2006) qui soulignent, qu'en présence d'asymptotes techniques, l'effet réel d'une taxe carbone se réduit asymptotiquement. En effet, lorsque les asymptotes sont atteintes, l'augmentation de la taxe n'a plus qu'un effet nominal et, du fait du son recyclage macroéconomique, joue de moins en moins sur les niveaux de l'offre et de la demande.

2.2 Développement énergétique sous contrainte carbone

La taxe carbone induit dans l'économie des changements structurels et technologiques en faveur (i) des activités faiblement intensives en énergie et (ii) des sources énergétiques peu intensives en carbone.

Une réduction substantielle de la consommation finale d'énergie

Dans le scénario *ETC* 450 ppmv, le volume et la répartition sectorielle de la demande finale d'énergie sont fortement modifiés par rapport à la trajectoire de référence (Figure 56). Le montant total de la demande finale d'énergie est progressivement réduit par rapport à la trajectoire de référence ; d'abord de 15% en 2030, puis de 29% en 2050 et enfin de 64% en 2100. Cette réduction importante de l'intensité énergétique permet d'obtenir une consommation d'énergie en légère décroissance à partir de 2050. Le taux de décroissance de la consommation finale d'énergie diminue au cours de la période 2050-2100 pour finalement s'annuler en fin de période. Ce phénomène est lié simultanément (i) à la saturation progressive des potentiels sectoriels d'efficacité énergétique, (ii) à la poursuite de l'augmentation de la richesse mondiale et (iii) à la persistance, avec l'augmentation des revenus et malgré le prix du carbone, d'une préférence importante des ménages pour la consommation de services non dématérialisés, en particulier de transport. Ceci se traduit par des **différences sectorielles significatives** dans les réductions de consommation finale d'énergie par rapport à la trajectoire de référence. Les secteurs industriels, agricoles ou des services connaissent des réductions importantes de consommation d'énergie par rapport au scénario de référence qui atteignent environ 75% en 2100 alors que le secteur des transports ne réduit sa consommation d'énergie que de 49% en 2100. Le secteur résidentiel occupe une situation intermédiaire avec une réduction de la consommation d'énergie par rapport à la trajectoire de référence voisine de 63% en 2100.

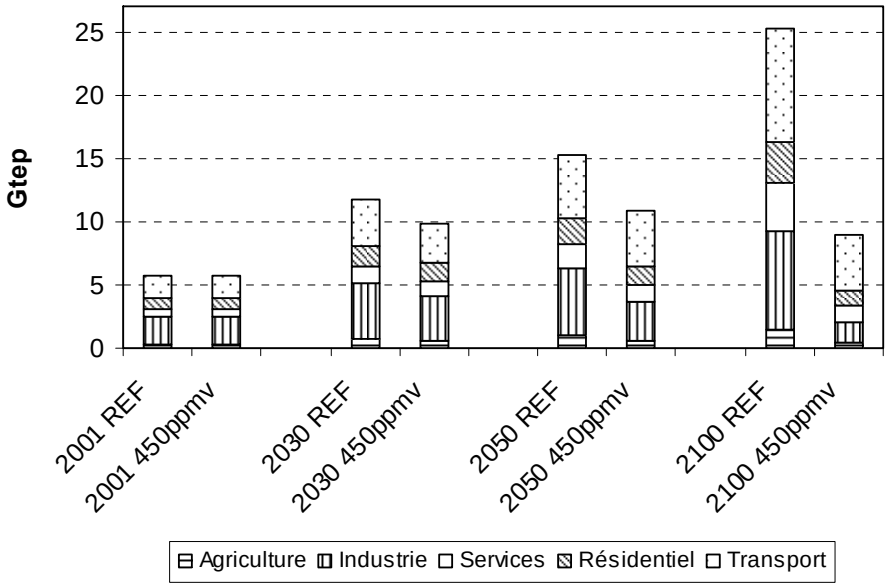


Figure 56 : Demande finale d'énergie à l'échelle mondiale par secteur, comparaison du scénario 450ppmv avec le scénario de référence, sélection de dates

La modification du niveau et de la composition sectorielle de la demande finale d'énergie à l'échelle mondiale s'accompagne d'une **mutation importante du système de transformation énergétique**. Celui-ci est simultanément impacté par (i) une incitation à la décarbonisation de la production d'énergie finale, (ii) des substitutions entre les énergies finales induites par la taxe au niveau de la demande et (iii) une modification de la répartition sectorielle de la consommation d'énergie.

L'électricité joue un rôle de substitut aux énergies fossiles pour la consommation finale

Malgré un volume de consommation finale d'énergie qui est en 2100 inférieur de 9% à son niveau de 2030, la production mondiale d'électricité augmente sur cette période de 73%. Ce regain de compétitivité vis-à-vis des autres sources d'énergie finale s'explique principalement par (i) la **faible réactivité** à l'introduction d'une taxe carbone de la consommation d'électricité pour les usages spécifiques et par (ii) les **potentiels de substitution** importants en faveur de l'électricité qui apparaissent dans le processus de réduction des émissions lorsque la structure de production de celle-ci commence à être décarbonisée.

La réactivité du secteur électrique à la mise en place de la taxe carbone est en effet importante du fait de la disponibilité, dès le début de la simulation, de technologies de production à contenu carbone nul et dont le seuil de compétitivité est atteint pour des valeurs du carbone relativement faibles (Figure 57). L'anticipation parfaite des valeurs futures du carbone dans les décisions d'investissement du secteur électrique conduit, dans un premier temps, à une pénétration accrue des énergies renouvelables et du nucléaire et à une prédominance des centrales au gaz sur celles au charbon. En 2030, 57% de l'électricité mondiale est ainsi produite sans émissions de CO_2 (contre 30% dans le scénario de référence), principalement à l'aide du nucléaire (25%), des énergies

renouvelables (18%) et de l'hydraulique (13%). La part des « technologies gaz », avec surtout des cycles combinés, augmente fortement par rapport au scénario de référence (32% contre 12%) où leur compétitivité face au charbon est largement limitée par l'augmentation générale des prix du gaz et du pétrole brut. Après 2030, le développement des technologies de captage et stockage géologique du CO_2 permet un retour du charbon dans le mix mondial de production électrique alors que les prix du gaz augmentent du fait de leur indexation sur le prix du pétrole. Ce retour est en outre facilité par les limites qui sont imposées à la diffusion des technologies nucléaires et renouvelables dans le parc de production électrique. Ainsi, à partir de 2050, la part d'électricité produite à partir du charbon avec un recours massif au captage et au stockage du CO_2 avoisine les 40%, le reste de la production reposant sur les technologies nucléaires, renouvelables et hydrauliques.

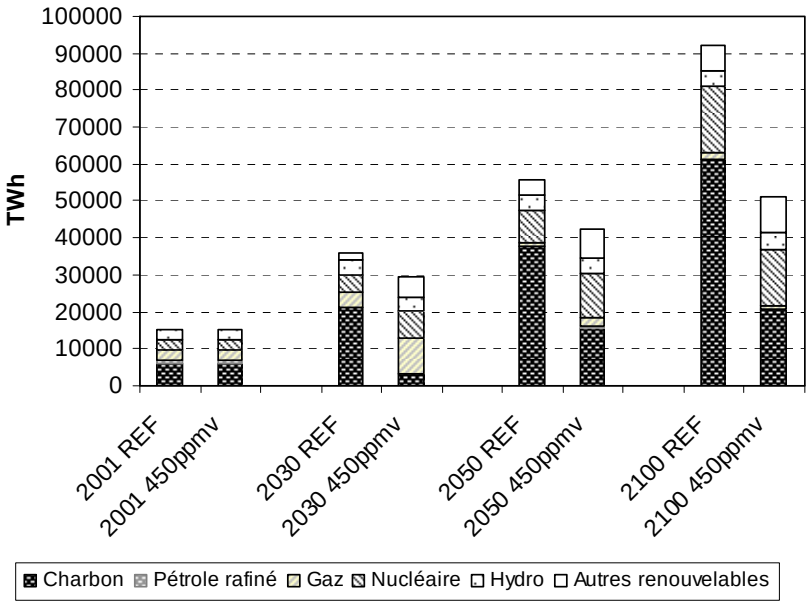


Figure 57 : Mix mondial de la production électrique par technologies, comparaison du scénario 450 ppmv avec le scénario de référence, sélection de dates

Carburants liquides : les politiques climatiques diminuent les tensions sans éviter le « peak oil »

L'introduction d'une taxe carbone dans le système énergétique mondial accélère le repli de la consommation des carburants liquides vers le secteur des transports et les gains d'efficacité énergétique dans ce même secteur. Même si l'effet de la taxe carbone est partiellement effacé par des prix du pétrole brut temporairement plus faibles dans le scénario *ETC* 450 ppmv que dans le scénario de référence, la consommation de carburants liquides est réduite de 12% en 2030, 13% en 2050 et de 52% en 2100 par rapport au scénario de référence (Figure 58). Cependant, la mise en place de la politique climatique ne modifie pas drastiquement l'évolution du contenu en transport de la trajectoire de croissance. Ainsi, la mobilité des personnes continue d'augmenter fortement dans ce scénario : +704% en moyenne, à l'échelle mondiale sur la période 2001-2100, contre +767% dans le scénario de référence. Du côté de l'offre, la pénétration des biocarburants sur le marché est accélérée dans le scénario *ETC* 450 ppmv avec une production en 2030 supérieure de 22% à celle

obtenue dans le scénario de référence. Cette différence s'atténue ensuite puisque la production de biocarburants n'est plus limitée par leur rentabilité mais par des contraintes pesant sur la disponibilité des terres agricoles et par la compétition avec les autres usages de la biomasse. La réduction en volume de la demande finale et la pénétration accélérée des biocarburants ne permet donc pas d'éviter l'apparition de contraintes de déplétion sur la production des ressources pétrolières. La date du pic de production pétrolière n'est pas retardée de beaucoup par la mise en place de la politique carbone, mais, la production au moment du pic étant moins élevée que dans le scénario de référence, le taux de diminution de la production après le pic se trouve fortement réduit. Après 2053, la technologie de liquéfaction du charbon avec captage et stockage du CO_2 émis au cours de la transformation permet de satisfaire une demande faiblement décroissante de carburants liquides du secteur des transports malgré une production pétrolière déclinante et des biocarburants contraints dans leur développement.

L'impact de la politique carbone sur le système d'approvisionnement du secteur des transports en carburants liquides est bien sûr à mettre en regard des problématiques liées à la sécurité énergétique. Si la date du pic de production pétrolière n'est pas fondamentalement modifiée par la politique de réduction des émissions, la réduction par rapport à la référence du taux de diminution de la production après le pic améliore la résilience du système à d'éventuelles frictions qui pèseraient sur le développement de la production de carburants à partir de la liquéfaction du charbon. Dans notre scénario de référence, le déclin rapide de la production pétrolière et la vigueur de la croissance de la demande nécessitent une forte augmentation de la production de carburants ex-charbon ; toute friction pesant sur le développement de ces nouvelles infrastructures conduirait dans ce contexte à de fortes tensions sur les prix. La mise en place de la politique climatique permet de diminuer significativement ces risques.

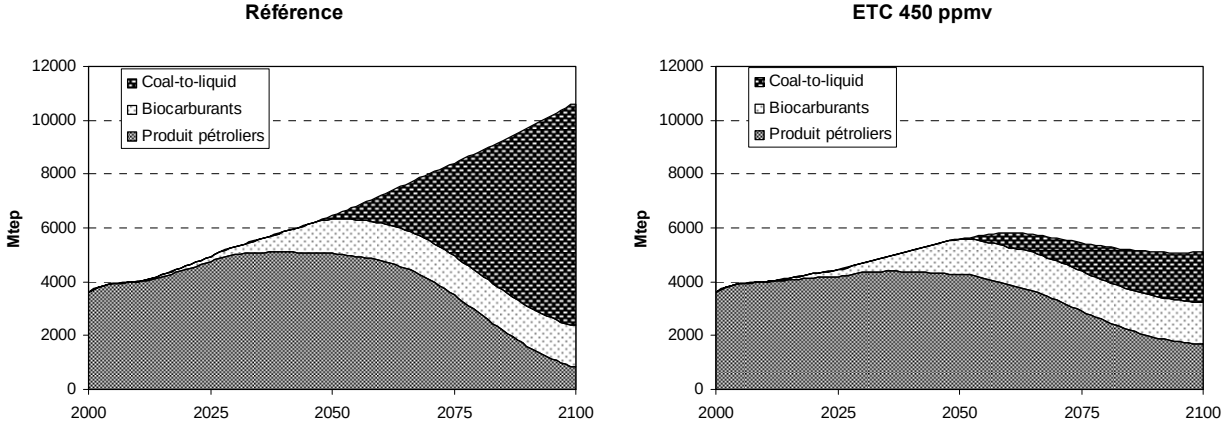


Figure 58 : Production mondiale de carburants liquides, comparaison du scénario ETC 450 ppmv avec la référence

Le rôle clé de la technologie de captage et stockage du CO_2

L'objectif de stabilisation de la concentration atmosphérique de CO_2 à 450 ppmv requiert un usage massif de la technologie de captage et stockage du CO_2 (Figure 59). Celle-ci intervient d'abord dans le **secteur électrique** avec un début de pénétration dans le parc de production en 2038,

suivi d'une période d'apprentissage conduisant simultanément à une réduction importante des coûts et une augmentation de l'efficacité du procédé. Ces améliorations permettent une diffusion importante de cette technologie. Au moment où apparaît la nécessité de mobiliser une source d'énergie alternative pour alimenter en énergie le secteur des transports, la technologie est déjà mature et permet le développement de la filière de liquéfaction du charbon avec captage et stockage du CO_2 pour palier la déplétion des réserves de pétrole brut. L'utilisation de cette filière technologique engendre une forte augmentation de la quantité annuelle de CO_2 stocké à partir des années 2070. Finalement, sur l'ensemble de la période de simulation, le procédé de captage et stockage concerne 32% des émissions brutes de CO_2, le reste étant émis dans l'atmosphère.

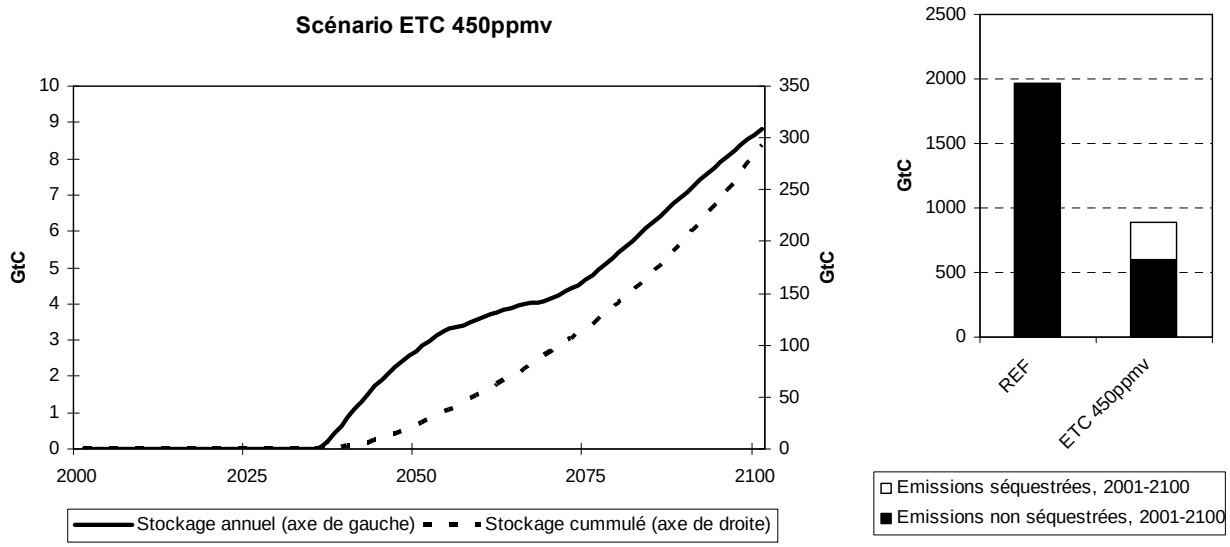


Figure 59 : Mobilisation de la technologie de captage et stockage du CO_2

Un point d'étape

En définitive, la présentation détaillée du contenu énergétique du scénario *ETC* 450 ppmv souligne l'importance de l'apprentissage technologique dans ce scénario, en particulier pour la technologie de captage et stockage du CO_2 qui y joue un rôle clé. L'utilisation massive de cette technologie présage des différences marquées avec les scénarios *ATC* où ces dynamiques d'apprentissage ne peuvent pas être accélérées par les politiques climatiques. Nous consacrons la prochaine section à la comparaison, entre les scénarios *ATC* et *ETC*, des coûts des politiques climatiques ainsi que des mécanismes qui les déterminent.

Avant cela, nous pouvons mener un bilan critique rapide des résultats obtenus dans le scénario *ETC* 450 ppmv. L'hybridation de l'analyse macroéconomique en équilibre général avec des informations technologiques sectorielles permet indéniablement d'améliorer le réalisme des trajectoires produites en introduisant des effets de seuil et de saturation dans les potentiels de changement technique. Cependant, le réalisme de nos scénarios peut être amélioré en prenant en compte plus précisément, les contraintes qui pèsent sur la vitesse de déploiement de nouvelles technologies à l'intérieur des parcs de production. Nous avons déjà accompli un premier effort dans cette direction en représentant le parc installé en génération de capital et en utilisant des formes

fonctionnelles pour les choix technologiques qui prennent en compte l'incertitude sur le coût des technologies et qui présentent donc des rigidités dans le basculement d'une technologie à une autre. Cette prise en compte de l'inertie associée à l'évolution des systèmes techniques nous conduit à produire des résultats qui peuvent être considérés comme pessimistes. Nous avons cependant négligé dans notre travail les éventuels goulets d'étranglement dans la chaîne de production des nouvelles technologies qui mèneraient à augmenter transitoirement leur coût. Ces phénomènes de frictions qui tendent à compenser temporairement le processus vertueux d'apprentissage peuvent pourtant avoir un impact important sur le niveau des coûts de transition dans les trajectoires de stabilisation qui nécessitent une action précoce et vigoureuse.

3 Changement technique endogène et coût de stabilisation

Nous abordons dans cette section le problème de l'évaluation du coût des politiques climatiques. Cette question permet de comparer les mécanismes de formation des coûts selon le mode de représentation du progrès technique que l'on adopte. Nous resterons d'abord concentré, dans la première sous-section, sur la comparaison des scénarios *ATC* et *ETC* dans lesquels l'induction du progrès technique **ne concerne que le secteur énergétique**. Dans la seconde sous section, nous revisiterons l'évaluation des coûts des politiques climatiques dans un cadre de représentation endogène du progrès technique qui **concerne tous les secteurs de l'économie**.

3.1 L'induction du changement technique permet de réduire les coûts

Le résultat de la comparaison des coûts pour atteindre un objectif de stabilisation climatique selon que la représentation du changement technique est autonome ou endogène n'est pas aussi évident à déterminer *a priori* que l'intuition qui a présidé initialement le laissait suggérer (Grubb, 1997). Imposer la problématique du changement technique endogène comme un moyen d'obtenir une évaluation plus optimiste des coûts d'une politique climatique revient à supposer que les scénarios *ETC* sont forcément moins coûteux parce que la mise en place des politiques climatiques induit une baisse du coût des technologies peu émettrices en même temps qu'elle augmente leur efficacité. La réalité est cependant différente puisque dans un scénario *ATC*, le changement technique « *tombe du ciel* » et les technologies s'améliorent sans coût à un rythme autonome quelles que soient les décisions d'investissement des agents économiques, les efforts de recherche et développement ou l'intensité des politiques environnementales. Finalement, dans ces scénarios, seul le déplacement le long de la frontière de production représente un coût, mais pas le changement technique lui-même.

La situation est différente dans les scénarios *ETC* où les avancées techniques à une date donnée dépendent de l'ensemble des décisions des agents économiques antérieures à cette date. Dès lors, le progrès technique, s'il peut entrer dans une boucle vertueuse déclenchée par les effets d'apprentissage, est en même temps très sensible à tout ce qui pourrait gripper cet effet, par exemple une instabilité des signaux économiques, produisant un effet temporaire d'irréversibilité incorporée dans les équipements installés ou bien une relance de l'apprentissage dans les technologies carbonées. De même un tel effet de « grippage » peut apparaître si la politique

climatique engendre un ralentissement de l'économie et des investissements qui ne permettent pas d'obtenir une accélération du progrès technique par rapport au scénario *ATC*.
En fait, nous retrouvons, pour comprendre la différence entre les scénarios *ETC* et *ATC*, une grande partie des mécanismes que nous avons observés lors de l'étude du scénario de référence et qui concernent les interactions entre le progrès technique, la formation de la demande finale et les choix de localisation. En effet, dans les scénarios *ETC*, le progrès technique peut être accéléré en réponse à l'imposition d'un signal de décarbonisation. Cette accélération accentue l'effet de « masque » joué par le progrès technique sur la transmission du signal de décarbonisation aux agents économiques et ce phénomène est particulièrement important pour le secteur des transports où l'accélération du progrès technique amortit l'effet de la taxe carbone sur le prix final de la mobilité. Les agents perçoivent donc plus tardivement, dans les scénarios *ETC*, la nécessité de modifier leurs stratégies de localisation et ce retard conduit potentiellement à augmenter le coût de changement de trajectoire par rapport aux scénarios *ATC*.

Au final, les résultats obtenus dans le cadre de notre travail sont accord avec ceux rencontrés dans la littérature (Weyant, 2004 ; Grubb et *al.* 2006) : le coût d'une politique climatique est moins important si la représentation du progrès technique est endogène que si elle est autonome, mais le gain est moins important que ce que l'on pouvait espérer.

L'indicateur le plus simple pour comparer les coûts techniques des politiques climatiques reste le profil des prix du carbone obtenu dans les deux scénarios, la Figure 60 compare ces profils pour les deux objectifs de stabilisation et les deux types de représentation du changement technique.

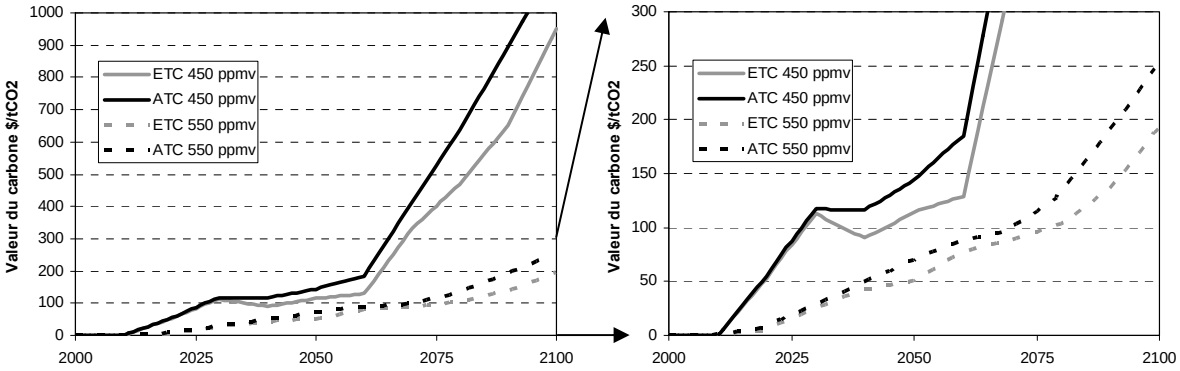


Figure 60 : Valeur du carbone dans les scénarios *ETC* 450 ppmv, *ETC* 550 ppmv, *ATC* 450 ppmv et *ATC* 550 ppmv sur la période 2001-2100 (graphe de gauche), zoom des mêmes trajectoires sur les valeurs du carbone inférieures à 300 $/tCO$_2$ (graphe de droite)

Quel que soit l'objectif de stabilisation considéré, la valeur de la taxe dans le scénario *ETC* est inférieure sur toute la trajectoire à celle obtenue avec dans le scénario *ATC*. L'induction du changement technique par les politiques climatiques permet donc d'obtenir, à niveau de prix identique, des réductions d'émissions plus importantes que dans un cadre de progrès technique autonome. L'écart entre les scénarios *ATC* et *ETC* est plus important pour un objectif de stabilisation à 450 ppmv que pour un objectif à 550 ppmv. Cependant, le progrès technique supplémentaire qui est induit dans les scénarios *ETC* ne permet pas de faciliter significativement la réalisation d'un objectif de stabilisation à 450 ppmv et les niveaux de taxes requis pour cet objectif

restent très élevés par rapport à l'objectif moins contraignant de 550 ppmv, aussi bien dans les scénarios *ATC* que *ETC*. Ces premiers résultats plutôt pessimistes suggèrent que le progrès technique « ***ne peut pas tout faire*** » lorsque l'on vise un objectif vraiment contraignant de stabilisation des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre. Ils découlent bien sûr en partie du poids des mécanismes endogènes que nous avons décrits dans la section 3 du chapitre 5 (effets de « masques », effets rebonds, induction de la mobilité par les politiques d'infrastructures etc.). Ces mécanismes spécifiques traduisent les interactions entre le changement technique, la formation de la demande finale et les politiques d'infrastructures. Ils mènent *in fine* à limiter la réalisation de potentiels technologiques et à compenser les progrès effectués par des effets de volumes. Leur prise en compte dans notre structure de modélisation tend donc à compliquer la réalisation d'objectifs de stabilisation exigeants et à les renchérir.

Contrairement à tous les autres scénarios où la valeur du CO_2 est strictement croissante, le profil de taxe obtenu dans le scénario *ETC* 450 ppmv a la particularité de présenter une allure composée de trois phases caractéristiques :

- La taxe suit une **courbe concave** sur la période 2010-2040. Ce profil est typiquement lié à l'apprentissage technologique qui est accéléré par la mise en place d'une politique climatique nécessitant une action vigoureuse de réduction des émissions sur le court terme. Progressivement, cet effet d'apprentissage permet à ces technologies de devenir compétitives à des prix du carbone inférieurs à ceux qui le permettaient en début de simulation. Les gisements de réduction associés à ces technologies se retrouvent donc accessibles à des prix du carbone qui sont décroissants avec le temps. Tant que l'exploitation de ces gisements est suffisante pour rester sur la trajectoire d'émission visée qui est cohérente avec l'objectif de stabilisation à 450 ppmv, le niveau de la taxe décroît.
- La seconde phase débute lorsque l'exploitation des gisements de réduction ne suffit plus pour rester sur une trajectoire compatible avec l'objectif de stabilisation. De nouvelles réductions d'émissions doivent être obtenues grâce à une augmentation des prix du CO_2 qui reste modérée au cours de cette phase (ces derniers s'accroissent de 40$ en vingt ans).
- La dernière phase présente une **très forte croissance des prix du CO_2** (ils augmentent de 820$ en 40 ans). La nécessité de réduction des émissions, après avoir exploité les gisements à coûts faibles, se heurte sur cette période à des dynamiques faiblement réactives aux prix. La contrainte imposée par le niveau de stabilisation se traduit donc par une très forte augmentation des prix du CO_2.

Nous retrouvons dans ce scénario un résultat obtenu dans la littérature avec des modèles plus simples qui utilisent des courbes d'apprentissages et qui prédisent une allure concave pour les prix du CO_2 en cas de politique de stabilisation (Anderson et Cavendish, 2001). Ces résultats n'ont pour le moment été que rarement confirmés par des modèles macroéconomiques ou en équilibre partiel (Grubb et *al.*, 2006). Ce que nous obtenons diverge tout de même de l'intuition initiale d'Anderson et Cavendish (2001) dans la mesure où les prix du CO_2 connaissent dans un troisième temps une période de très forte croissance. Nous revenons en détail sur les dynamiques sectorielles qui expliquent ce profil dans la suite de ce chapitre.

Les niveaux de taxe nécessités par les différents objectifs de stabilisation conduisent, quel que soit le type de description du progrès technique, à des pertes de PIB importantes, généralement supérieures à celles obtenues dans les scénarios publiés dans le quatrième rapport du GIEC pour les mêmes objectifs de stabilisation (Fisher et *al.*, 2007, p.206). Pour les quatre scénarios qui sont l'objet de notre attention, le Tableau 17 compare les **coûts de la stabilisation** en termes de pertes actualisées de PIB (le taux d'actualisation est fixé à 5%). L'induction du changement technique dans le secteur énergétique permet de diminuer les coûts actualisés de la stabilisation qui passent au niveau mondial de 1.52% du PIB actualisé de référence dans le scénario *ATC* à 1.27% dans le scénario *ETC* pour un objectif de stabilisation à 550 ppmv. Cette amélioration correspond à une réduction des pertes de 16.4% grâce au progrès technique induit par les politiques climatiques. Pour un objectif de stabilisation réduit à 450 ppmv, l'impact de l'induction du progrès technique sur la formation des coûts augmente légèrement et les pertes actualisées sont réduites de 20.8% dans le scénario *ETC* par rapport au scénario *ATC* en passant de 3.55% du PIB actualisé de référence à 2.81%.

Les pertes agrégées présentent des **différences régionales importantes**. Les régions non Annexe 1 subissent ainsi des pertes de richesse beaucoup plus importantes que celles de l'Annexe 1. Ceci s'explique principalement par la structure initiale des économies des régions non Annexe 1 où l'intensité carbone de la production est beaucoup plus importante que dans les régions Annexe 1. Cet effet est amplifié par la structure initiale de la croissance économique dans les régions émergentes qui repose en grande partie sur les exportations. La taxe carbone, en altérant la compétitivité de ces structures de production a un effet sur la richesse plus important que dans des régions où la croissance repose plus sur la consommation et l'investissement. En fin de compte, le coût de transition lié à la décarbonisation est plus fort dans les régions en développement que dans les régions de l'Annexe 1 et ces coûts de court/moyen terme comptent pour beaucoup dans la formation du coût agrégé des politiques.

	ETC		**ATC**	
	550 ppmv	**450 ppmv**	**550 ppmv**	**450 ppmv**
Pertes actualisées de PIB réel mondial	1,27%	2,81%	1,52%	3,55%
Pertes actualisées de PIB réel Annexe 1	0,56%	1,47%	0,67%	1,83%
Pertes actualisées de PIB réel non Annexe 1	2,69%	3,20%	5,49%	7,00%

Tableau 17 : Coûts de la stabilisation pour différents objectifs et avec sdifférentes représentation du progrès technique.

Les résultats que nous venons de présenter soulèvent deux questionnements principaux qui sont débattus dans la suite de ce chapitre :

- La **dynamique de formation des coûts** d'une politique climatique est modifiée par les hypothèses adoptées au niveau de la réaction du changement technique à la mise en place de ces politiques. Il apparaît nécessaire de comprendre la nature des déterminants et des

mécanismes en jeu et la façon dont ils conduisent à nos résultats. Nous traitons cette question dans la suite de cette section.

- Le niveau de taxe requis augmente fortement pour atteindre un objectif de stabilisation à 450 ppmv par rapport à un objectif de 550 ppmv et ce, quelle que soit la spécification adoptée pour décrire la dynamique du progrès technique. Ce résultat suggère l'existence d'**obstacles à une réduction importante des émissions de CO_2** qui ne réagiraient que faiblement à un signal prix du carbone ou à une amélioration induite des technologies disponibles. Il s'agit dans la section suivante d'identifier ces obstacles et d'en tirer des conséquences pour les politiques de réduction des émissions de CO_2. Nous aborderons ce problème dans la section 4 de ce chapitre.

3.1.1 Pourquoi l'induction du changement technique réduit le niveau de la taxe ?

La compréhension des mécanismes qui conduisent à obtenir des coûts différents selon que l'on se trouve dans les scénarios *ATC* ou *ETC* nécessite de comparer, entre les deux spécifications, la réactivité des systèmes techniques à l'imposition d'une taxe carbone.

Dans toutes les simulations, la taxe carbone induit une mutation des systèmes techniques vers des filières de production et des modes de consommation à faible contenu carbone *via* (i) la modification du mix énergétique en faveur de l'utilisation de sources d'énergies propres et (ii) l'amélioration de l'efficacité énergétique des équipements de transformation ou d'usage final de l'énergie. Le niveau de taxe requis pour atteindre un objectif de stabilisation donné est déterminé par les possibilités de substitution dans le secteur énergétique, aussi bien du côté de l'offre que de la demande, à chaque point du temps sur l'ensemble de la simulation. Les différences obtenues entre les scénarios *ATC* et *ETC* reposent sur les dynamiques associées à l'évolution de ces possibilités de substitution.

Sans induction du progrès technique, pour une valeur du carbone donnée, les possibilités de substitution rentables évoluent de façon autonome en fonction des modifications exogènes des caractéristiques des technologies à faible contenu carbone. La vitesse de pénétration de ces technologies dans le parc de production existant est limitée par le rythme de renouvellement du capital. Plus l'objectif de stabilisation est exigeant, plus le niveau de taxe requis est important pour induire des substitutions plus marquées vers des filières à faible contenu carbone.

Avec induction du changement technique par les politiques climatiques, ce phénomène est en partie évité : un niveau donné de la taxe carbone implique l'adoption de technologies faiblement intensives en carbone dont le coût diminue à mesure qu'elles sont utilisées en même temps que leur efficacité augmente. Ce processus d'amélioration de la rentabilité de ces techniques permet une augmentation des potentiels de substitution qui leur sont associés et accélère leur déploiement dans le stock de capital. De plus, l'amélioration induite des caractéristiques techniques mêmes des technologies (le rendement en particulier) permet de modifier la frontière de production et donne un degré de liberté supplémentaire aux économies pour réduire leurs émissions de CO_2.

Pour mieux comprendre l'origine des différences entre les scénarios *ATC* et *ETC*, revenons à un exercice « technique » de comparaison de la réaction des deux membres énergétiques de

l'intensité de Kaya (l'intensité énergétique du PIB mondial et l'intensité carbone du système énergétique) à la mise en place d'une taxe. Cet exercice est « technique » car nous utilisons des profils de taxes linéaires entre 2010 et 2100 et donc peu réalistes, pour faciliter la comparaison entre les scénarios et raisonner à taxe constante.

La Figure 61 compare les variations de l'**intensité énergétique du PIB** mondial par rapport à la référence entre les scénarios *ATC* et *ETC* pour divers profils de taxe.

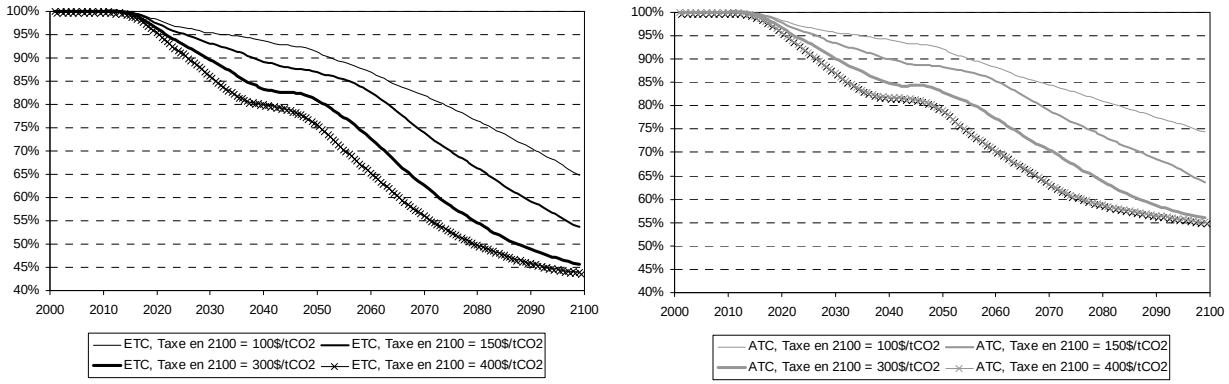


Figure 61 : Comparaison entre les scénarios ETC et ATC de la réduction de l'intensité énergétique du PIB mondial par rapport à la trajectoire de référence pour différents profils de taxe carbone

Pour des niveaux de taxe identiques, l'intensité énergétique du PIB mondial est plus fortement réduite par rapport à la trajectoire de référence dans les scénarios *ETC* que dans les scénarios *ATC*. Les réductions supplémentaires dues à l'*ETC* sont progressives et du même ordre de grandeur quel que soit le profil de taxe ; elles atteignent en fin de période une magnitude voisine de 10% de l'intensité énergétique du PIB de référence. Cependant, quelle que soit la spécification adoptée pour décrire le changement technique, le processus de réduction de l'intensité énergétique du PIB mondial par rapport à la trajectoire de référence atteint une valeur limite avec l'augmentation du niveau de la taxe ; le niveau de cette asymptote est différent selon que l'on se trouve dans les scénarios *ATC* ou *ETC*. Nous retrouvons ici sans surprise les hypothèses que nous avons adoptées quant à l'existence d'asymptotes techniques sur l'amélioration de l'efficacité des principales technologies du secteur énergétique. Dans les scénarios *ETC*, le phénomène d'apprentissage permet non seulement d'accélérer la pénétration de ces technologies plus efficaces mais aussi d'aller plus loin dans la réalisation des potentiels ultimes d'efficacité énergétique. C'est ce dernier point qui mène, entre les scénarios *ETC* et *ATC*, à une différence de réduction d'intensité énergétique par rapport au scénario de référence, quelle que soit la croissance annuelle de la taxe carbone adoptée.

Toujours en utilisant des profils de taxe linéaires, la Figure 62 représente au cours du temps les pourcentages de réduction supplémentaires de **l'intensité carbone du système énergétique mondial** par rapport à la trajectoire de référence dans les scénarios *ETC* comparés aux scénarios *ATC* obtenus avec les mêmes profils de taxe.

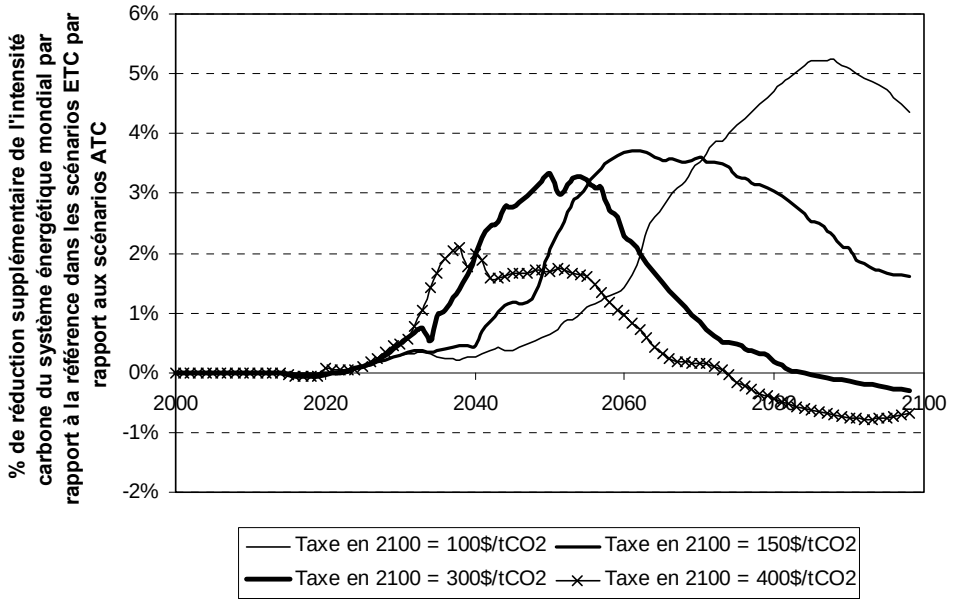


Figure 62 : % de réduction supplémentaire de l'intensité carbone du système énergétique mondial par rapport à la référence dans les scénarios ETC par rapport aux scénarios ATC pour différents profils de taxe

Pour un même niveau de taxe, la réduction de l'intensité carbone du système énergétique par rapport à la référence ne change que faiblement entre les scénarios *ETC* et *ATC*. L'induction du changement technique par les politiques climatiques permet d'obtenir au maximum une réduction supplémentaire de 5.2% de l'intensité carbone du système énergétique mondial par rapport à la trajectoire de référence. Quel que soit le niveau de taxe envisagé, la décarbonisation supplémentaire obtenue dans le scénario *ETC* est transitoire et l'on assiste, à profil de taxe identique, à une tendance générale au rattrapage des scénarios *ETC* par les scénarios *ATC*. De plus, l'écart entre les scénarios *ATC* et *ETC* diminue lorsque la vitesse de croissance annuelle de la taxe carbone augmente. Et pour des profils de taxe fortement croissants, le phénomène va même jusqu'à s'inverser sur les dernières décennies de la simulation où l'intensité carbone du système énergétique devient plus importante dans le scénario *ETC* que dans l'*ATC*. Pour une croissance de la taxe de 1.66 $/tCO$_2$/an (150$/tCO$_2$ en 2100), l'induction du progrès technique permet d'obtenir une décarbonisation supplémentaire supérieure à 2% sur une durée de 40 ans ; cette valeur se réduit à 22 ans pour une croissance de 2.22 $/tCO$_2$/an (200$/tCO$_2$ en 2100), et à 2 ans pour une croissance de 3.33$/tCO$_2$/an (300$/tCO$_2$ en 2100). L'induction du changement technique permet donc, à niveau de taxe identique, d'accélérer la pénétration des sources d'énergie à faible contenu carbone pendant la phase transitoire de décarbonisation du système énergétique. Cette accélération s'observe particulièrement pour des profils de taxe présentant une vitesse de croissance modérée mais disparaît progressivement ou s'inverse au fur et à mesure de l'augmentation de cette vitesse. L'explication de ces phénomènes réside principalement dans l'existence de deux mécanismes agissant simultanément, l'un étant relié à l'**impact structurel** de la modélisation endogène du changement technique, l'autre aux dynamiques de **déploiement des filières technologiques** à contenu carbone faible ou nul.

La décarbonisation du système énergétique s'obtient au prix d'une modification du contenu de l'approvisionnement en énergie primaire au profit de sources d'énergies à contenu carbone réduit

ou nul (telles que les énergies renouvelables, l'énergie nucléaire etc. …) ou bien *via* l'utilisation de technologies de captage et stockage du CO_2.

Selon le type d'énergie finale considérée, le potentiel de décarbonisation qui est associé à sa filière de production est plus ou moins important. Il existe ainsi de vastes potentiels de décarbonisation pour la production d'électricité alors que les alternatives non carbonées aux carburants liquides sont plus rares. La vitesse de décarbonisation d'un système énergétique dépend donc du **contenu de la demande finale d'énergie**. Les scénarios *ETC* conduisent simultanément, par rapport au cadre *ATC*, à des gains d'efficacité énergétique importants dans les secteurs productifs et à des pertes de revenu moins significatives pour les ménages. Ceci conduit, surtout en fin de période de simulation, à une part plus importante du secteur des transports dans la consommation d'énergie finale. Et comme la consommation d'énergie des transports repose principalement sur des carburants liquides, leur part dans la demande finale d'énergie est plus importante, au détriment de l'électricité, dans les scénarios *ETC* que dans ceux *ATC*. Ce phénomène joue en faveur d'une intensité carbone plus importante en *ETC* qu'en *ATC* et c'est ce que l'on retrouve dans les dernières décennies des simulations avec un niveau de taxe élevé.

D'autre part, la pénétration des filières de production d'énergie sans émission dépend de leur **rentabilité par rapport aux filières classiques**. Du fait de l'introduction de courbes d'apprentissage, une technologie peut être améliorée dans les scénarios *ETC* à partir du moment où des agents commencent à l'utiliser. Pour qu'ils commencent à l'utiliser, il faut que le prix du carbone soit tel que son seuil de rentabilité ait été atteint ; or en début de simulation, ce seuil de rentabilité est identique dans les scénarios *ETC* et *ATC*. La différence ne se matérialise qu'ensuite, lorsque le seuil de rentabilité des filières à faible contenu carbone diminue face à un niveau de taxe donné dans les scénarios *ETC*. Ces améliorations permettent à la filière de pénétrer sur le marché plus rapidement que dans les scénarios *ATC* parce que les différentiels de rentabilité avec les autres filières s'accroissent plus rapidement. Ce phénomène s'estompe lorsque le profil temporel de la taxe carbone est fortement croissant. En effet, pour une technologie donnée, le seuil de rentabilité est atteint pour la première fois au même prix du carbone dans les scénarios *ATC* et *ETC*. Dans les scénarios *ETC*, l'apprentissage permet ensuite de diminuer le niveau de taxe carbone nécessaire pour assurer la rentabilité de cette technologie. Cependant, puisque le prix du carbone est dans une dynamique de forte croissance, le différentiel de rentabilité de la filière alternative par rapport aux autres filières augmente fortement aussi dans les scénarios *ATC* et assure ainsi une pénétration rapide de cette technologie.

Cette situation se retrouve particulièrement pour les technologies du secteur électrique où, selon le GIEC, la majorité des potentiels d'abattement peuvent être exploités à des prix du carbone inférieurs à 50$/t$CO_2$ (Sims et *al.*, 2007, tableau 4.19 p. 300). Pour un objectif de stabilisation à 450 ppmv, cette valeur est dépassée par la taxe dans nos scénarios dès 2019 (*ATC* et *ETC*). L'effet de l'induction du changement technique par les politiques climatiques est limité aussi dans ce secteur puisque d'importants progrès ont été effectués dans la trajectoire de référence pour les technologies de production à partir d'énergies renouvelables. Ces améliorations techniques se retrouvent dans les scénarios *ATC* et tendent à diminuer, en termes de décarbonisation du secteur énergétique, l'écart apporté par l'induction du changement technique.

3.1.2 L'induction du changement technique réduit les dépenses énergétiques de décarbonisation

En fin de compte, l'induction du changement technique par les politiques climatiques améliore la réactivité des systèmes techniques à la mise en place d'une taxe carbone, même si nous avons démontré l'existence de mécanismes qui expliquent pourquoi l'écart entre scénarios *ETC* et *ATC* reste limité. A l'échelle du secteur énergétique, l'effet vertueux du progrès technique induit se traduit économiquement par une réduction du coût de la décarbonisation. En effet, l'induction du changement technique permet dans les scénarios *ETC* une diminution progressive des **coûts de production de l'énergie finale** à faible contenu carbone et des **besoins d'investissement** du secteur énergétique pour la décarbonisation. Ces deux facteurs conduisent à une limitation du coût macroéconomique des politiques de réduction des émissions de CO_2.

La baisse des coûts de production de l'énergie finale liée à la redirection du changement technique par les politiques climatiques est particulièrement marquée pour le secteur électrique. La Figure 63 compare, pour les scénarios *ETC* 450 ppmv et *ATC* 450 ppmv, la variation des prix finaux de l'électricité par rapport à la référence dans deux régions caractéristiques, l'Europe et la Chine. Logiquement le processus de décarbonisation s'accompagne sur toute la période d'une hausse du prix de l'électricité par rapport à la référence. Cependant le profil temporel de cette hausse diffère selon les régions et le mode de traitement du changement technique.

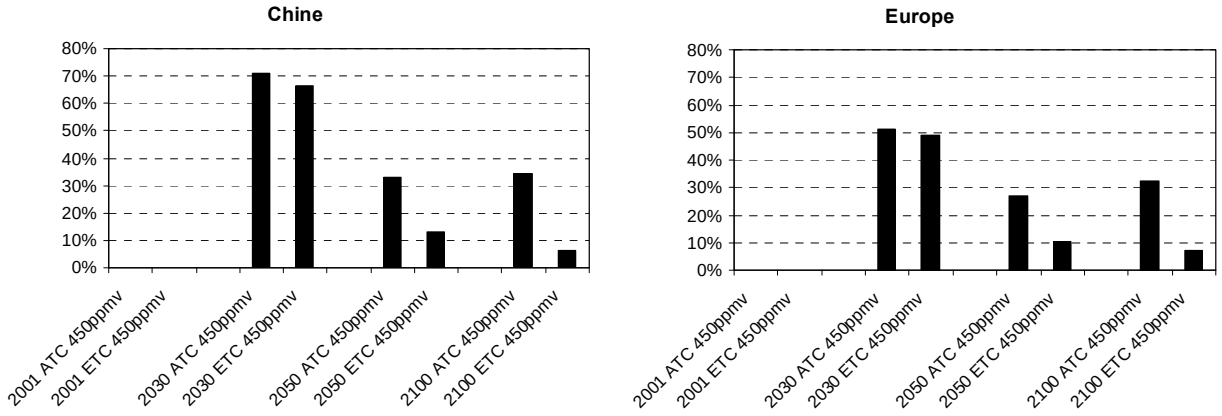


Figure 63 : Variation des prix finaux de l'électricité par rapport au scénario de référence, comparaison des scénarios *ETC* 450 ppmv et *ATC* 450 ppmv, sélection de dates

Quelle que soit la région, la hausse relative du prix de l'électricité par rapport au scénario de référence est plus importante dans le scénario *ATC* que dans le scénario *ETC* et cette différence croît en fonction du temps. En début de période, le cadre *ETC* permet une pénétration plus rapide des technologies peu émettrices par rapport au scénario *ATC* et cette accélération conduit à une levée plus rapide de la contrainte d'inertie liée au renouvellement du parc existant. Sur le moyen et long terme, la décarbonisation du système de production électrique passe, dans les scénarios *ATC* et *ETC*, par l'utilisation massive de la technologie de captage et stockage du CO_2 après saturation des contraintes liées à la diffusion des technologies nucléaires et renouvelables. L'induction du progrès technique par les politiques climatiques permet une forte réduction du coût des centrales équipées de terminaux de captage et stockage des émissions dans le scénario *ETC*. Ces progrès permettent

une réduction du prix de l'électricité par rapport au scénario ATC de l'ordre de 19% en Europe et 21% en Chine à l'horizon 2100.
Lorsque l'on entre dans le détail des dynamiques régionales, la Chine connaît *en début de période* une augmentation du prix de l'électricité plus importante que l'Europe aussi bien dans les scénarios *ETC* qu'*ATC*. Ce phénomène, qui se retrouve dans d'autres économies émergentes, est essentiellement dû à la structure initiale du système de production d'électricité, reposant sur l'utilisation du charbon. En effet, l'inertie liée au renouvellement du parc de production déjà installé ainsi que la persistance, pendant quelques années en début de période, d'investissements dans des technologies charbon conventionnelles conduisent ces technologies à garder une place importante dans le parc de production chinois pendant une trentaine d'années. L'anticipation des valeurs futures de la taxe dans les décisions d'investissement des agents du secteur permet cependant de limiter l'ampleur de l'augmentation des prix de l'électricité en éliminant rapidement les technologies charbon sans captage et stockage du CO_2 des nouveaux investissements du secteur électrique. *En fin de période*, les différences de prix entre les deux régions s'estompent car les parcs de production ont eu le temps d'être totalement renouvelés avec des technologies de production faiblement émettrices. L'hypothèse de percolation du changement technique à travers les régions (*spillover*) est déterminante pour expliquer la faible différence de prix de production de l'électricité entre les deux régions, à long terme dans le cadre *ETC*. En effet, le progrès technique induit par les politiques climatiques n'est pas limité à la région qui en est la source et se diffuse, sans rémunération, à l'ensemble des autres régions du monde. Ce point précis est aujourd'hui central dans le cadre des négociations climat, mais nous avons supposé dans nos scénarios, par soucis de simplicité, qu'un cadre légal spécifique a été mis en place pour résoudre ce problème.

Pour un objectif de limitation des concentrations de CO_2 à 450 ppmv, la différence de prix de l'énergie électrique observée entre les scénarios *ETC* et *ATC* est un facteur explicatif central de la différence observée dans le Tableau 17 pour le coût macroéconomique agrégé des politiques climatiques. L'électricité joue en effet un rôle de substitut important dans la décarbonisation des systèmes énergétiques et la réduction du coût de production de l'électricité à faible contenu carbone dans le scénario *ETC* par rapport au scénario *ATC* intervient à la fois au niveau du **budget des ménages** et de la **structure de coût des secteurs** de production. Des prix de l'électricité généralement plus faibles dans le scénario *ETC* limitent la perte de pouvoir d'achat des consommateurs à chaque point du temps et, donc, l'effet d'éviction sur les consommations non énergétiques, en même temps qu'ils diminuent les pertes de profitabilité des secteurs de production liées aux surcoûts de décarbonisation auxquels ils doivent faire face.

Du côté du **marché du capital**, l'induction du progrès technique par les politiques climatiques dans le scénario *ETC* conduit à une réduction importante du prix des équipements énergétiques peu émetteurs. Ceci limite, par rapport au scénario *ATC,* la réallocation des facteurs de production nécessitée par le processus de décarbonisation. A titre d'exemple, l'investissement mobilisé pour les technologies non émettrices de production d'électricité sur la période 2050-2100 est inférieur de 70% à l'échelle mondiale dans le scénario *ETC* par rapport au scénario *ATC*. Même si les gains d'efficacité énergétique supplémentaires induits par les politiques climatiques permettent une réduction de la production électrique de 9% sur la même période, la réduction du coût fixe de construction de ces centrales due au cadre *ETC* contribue au reste de ce gain. Ces réductions jouent un rôle important dans la formation des coûts macroéconomique d'une politique

climatique. En effet, comme une politique climatique provoque des investissements de décarbonisation qui n'auraient pas été effectués dans la trajectoire de référence, l'ampleur de cette redirection détermine la diminution de la rentabilité moyenne des capitaux observée à l'échelle de l'économie entière dans les scénarios de stabilisation. De plus, les capitaux mobilisés pour la décarbonisation manquent au développement des secteurs productifs de l'économie qui sont plus intensifs en travail que les secteurs énergétiques.

3.2 Coûts macroéconomiques : une mauvaise surprise liée à la représentation endogène de la croissance ?

Le bilan sur le secteur énergétique de l'induction du changement technique explique une grande part des différences en termes de coût agrégé des politiques climatiques obtenues entre les scénarios *ATC* et *ETC*. Cependant, le cadre envisagé jusqu'ici pour l'induction du progrès technique dans ces scénarios se résume au seul secteur énergétique. Or ce cadre d'évaluation de l'impact des politiques climatiques sur la vitesse et la direction du progrès technique doit être étendu aux autres secteurs de l'économie. Ce problème est central puisqu'il touche aux mécanismes de formation des coûts macroéconomiques des politiques climatiques. En effet, la relation quantitative entre la réalisation d'un objectif climatique donné et les pertes de PIB qui en résultent, découle de l'interaction entre deux canaux de propagation distincts.

Tout d'abord, **en statique**, le prix du carbone diminue le pouvoir d'achat des ménages en engendrant une augmentation des dépenses associées à la consommation de biens énergétiques. Cette augmentation conduit à la formation d'un effet d'éviction au détriment de la consommation des autres biens non énergétiques.

L'induction du changement technique par les politiques climatiques permet de diminuer l'ampleur de cet effet d'éviction en conduisant simultanément à (i) un niveau de taxe plus faible pour le même objectif de stabilisation, (ii) des gains d'efficacité plus rapides et plus importants pour les équipements d'usage final de l'énergie, (iii) une pénétration plus rapide des filières à faible contenu carbone dans l'offre énergétique et finalement (iv) une réduction progressive des coûts de production de l'énergie à faible contenu carbone *via* l'induction de baisses du coût en capital et d'augmentation des rendements des technologies associées. Ces mécanismes s'appliquent aussi aux secteurs productifs où la taxe carbone pèse sur les coûts de production et diminue la profitabilité des secteurs.

En dynamique, les coûts d'une politique climatique résultent de l'interaction entre la taxe carbone, le processus d'accumulation du capital et l'évolution de la productivité générale des facteurs qui sont des paramètres déterminants pour le fonctionnement du moteur de croissance. En dehors d'un cadre de représentation endogène de la croissance, la taxe n'influe pas sur les gains annuels de productivité du travail qui restent exogènes sur toute la période de simulation. En revanche, en pesant sur le budget des ménages et sur la rentabilité des secteurs productifs, la taxe ralentit la croissance économique, ce qui réduit le rythme de renouvellement du capital et limite la vitesse de pénétration des filières faiblement intensives en carbone dans le stock d'équipements. Dans les scénarios *ETC* et *ATC*, la taxe altère principalement la dynamique d'accumulation du capital mais le ralentissement de l'activité engendré par une politique carbone ne modifie pas la

dynamique des gains de productivité et ne pèse donc pas sur les potentiels de croissance des économies.

Pour évaluer comment les modes de formation des coûts d'une politique climatique sont modifiés lorsque l'on se trouve dans un cadre de **représentation endogène généralisée de la croissance économique**, nous introduisons de nouveaux scénarios de stabilisation obtenus avec ce type de description du changement technique. Cette famille de scénarios, notée dans la suite *ETC_G*, est simulée avec une représentation endogène du changement technique à la fois pour le secteur de l'énergie et pour les autres secteurs de l'économie, en suivant les spécifications décrites au chapitre 2 (*cf.* section 4.1.2). Les objectifs de stabilisation, à 550 ppmv et 450 ppmv, restent identiques à ceux adoptés dans les scénarios *ATC* et *ETC*.

Dans les scénarios *ETC_G*, le moteur de la croissance est endogène et l'évolution de la productivité est liée à la dynamique des investissements sectoriels. La redirection des investissements induite par les politiques climatiques peut donc modifier le fonctionnement du moteur de croissance et la distribution sectorielle des gains de productivité. Plusieurs mécanismes sont alors en jeu simultanément :

- Le **volume des capitaux** disponibles pour l'investissement dans chaque région est altéré par l'impact de la politique climatique sur le niveau général de l'activité économique. Ainsi, les pertes de richesse associées à la mise en place des politiques climatiques entraînent, par un effet de volume, la diminution de la quantité de capitaux disponibles pour l'investissement. L'hypothèse de constance de la part du profit des secteurs réinvestie et des taux d'épargne des ménages entre la référence et les scénarios de stabilisation renforce l'importance de cet effet. Toute variation de revenu pour les ménages ou de profit pour les secteurs, se retrouve donc mécaniquement répercutée sur le volume des capitaux disponibles pour l'investissement.
- Le besoin d'investissement nécessaire à la décarbonisation nécessite une redirection des investissements en faveur des secteurs énergétiques aussi bien du côté de l'offre que de la demande. Cette redirection provoque un **effet d'éviction** sur les capitaux disponibles pour les autres secteurs de l'économie. Cet effet est potentiellement amorti par les processus d'apprentissage qui permettent de diminuer le coût en capital des technologies de décarbonisation.
- La modification de la **répartition sectorielle de la demande** des ménages en réaction aux variations de prix des biens de consommation finale induites par la taxe carbone modifie la demande adressée aux secteurs de production, leurs besoins d'investissement et donc les progrès qui leur sont associés en termes de productivité.

Mais si les économies sont sensibles, dans ce contexte, à un effet de « grippage » du progrès technique général dû à la mise en place d'une politique climatique, une ré-accélération de leur croissance est aussi envisageable une fois que les efforts de décarbonisation ont été effectués. De plus, l'évolution structurelle de l'activité possède un lien endogène supplémentaire avec la demande finale des ménages. En effet, les politiques climatiques peuvent accélérer la dématérialisation de l'économie en favorisant l'innovation dans les secteurs les moins intensifs en carbone *via* la déformation des systèmes de demande finale qu'elles induisent.

Les résultats obtenus dans cet exercice, et qui, pour permettre une comparaison stricte avec l'exercice précédent, ne considèrent pas la mise en place de politiques spécifiques pour induire une évolution structurelle différente de l'activité à travers par exemple, des besoins de transport plus faibles ou des styles d'urbanisme fondés sur une densification de l'habitat, font apparaître des possibilités de « grippage » du progrès technique général associées à la mise en place d'une politique de réduction des émissions de gaz à effet de serre (Tableau 18).

	ETC		**ATC**		**ETC_G**	
	550 ppmv	**450 ppmv**	**550 ppmv**	**450 ppmv**	**550 ppmv**	**450 ppmv**
Pertes actualisées de PIB réel mondial	1,27%	2,81%	1,52%	3,55%	1,82%	3,98%
Pertes actualisées de PIB réel Annexe 1	0,56%	1,47%	0,67%	1,83%	0,70%	1,77%
Pertes actualisées de PIB réel non Annexe 1	2,69%	5,49%	3,20%	7,00%	4,06%	8,41%

Tableau 18 : Coûts de la stabilisation pour différents objectifs, comparaison des scénarios *ETC*, *ATC* et *ETC_G*

Les pertes actualisées de PIB mondial sont plus importantes dans les scénarios *ETC_G* que dans les scénarios *ETC* et le surcoût avoisine les 40% pour les deux objectifs de stabilisation. Au-delà de ce chiffre agrégé qui est en soi très élevé, les hétérogénéités régionales sont importantes. Les politiques climatiques perturbent ainsi plus faiblement le moteur de croissance dans les régions de l'Annexe 1 que dans les autres : pour un objectif de stabilisation à 450 ppmv, les coûts augmentent de 20% dans le premier groupe contre 53% dans le second. Nous revenons immédiatement sur les raisons de cette différence entre régions, mais il convient, avant d'y venir, de remarquer qu'en dépit de potentiels d'améliorations technologiques identiques, le niveau de taxe requis dans les scénarios *ETC_G* est légèrement plus faible par rapport aux scénarios *ETC*, à objectif de stabilisation constant, en raison du ralentissement de l'activité plus important provoqué par la mise en place de la politique carbone. En d'autres termes, un niveau plus faible de taxes est requis tout simplement en raison de l'effet dépressif plus fort de la taxe sur l'activité économique. Au total, en effet, les pertes de richesses observées dans les scénarios *ETC_G* sont supérieures à celles obtenues dans les scénarios *ATC*. Ces résultats soulignent l'importance des mécanismes habituellement négligés dans les autres structures de modélisation et qui peuvent conduire à inverser les conclusions généralement tirées des modèles dans ce débat.

Ces résultats se comprennent en regardant l'impact des politiques climatiques sur l'évolution des productivités sectorielles. Pour les deux principaux secteurs de production (industrie et services), sous un objectif de stabilisation à 450 ppmv, le taux de croissance annuel moyen de la productivité du travail est diminué par rapport à la référence dans toutes les régions du modèle, ceci avec des différences selon les régions et les secteurs (Figure 64).

Dans la totalité des régions représentées sur la Figure 64, l'évolution de la productivité du travail est plus altérée par la politique carbone dans le secteur industriel que dans le secteur de production des services. Ceci souligne l'effet structurel de la taxe carbone sur la consommation des ménages qui aboutit à une diminution de la part des biens matériels au profit des services dont la production est

moins intensive en énergie. A cet effet de volume s'ajoute l'impact négatif de la taxe sur la profitabilité des secteurs de production qui est plus important pour ceux qui utilisent les filières de production les plus intensives en carbone. Tout cela joue en faveur d'une réallocation des investissements sectoriels vers la production des services et donc d'**un effet asymétrique de la taxe sur les gains sectoriels de productivité**.

En termes de disparités régionales, les économies émergentes sont beaucoup plus touchées que celles des régions de l'Annexe 1 pour le ralentissement des gains de productivité dû à la politique carbone. Ceci s'explique tout d'abord par les différences de niveaux de croissance qui sont observées entre ces régions dans la trajectoire de référence. La dynamique de forte croissance des régions non-Annexe 1 repose sur des gains de productivité importants obtenus sur toute la période de simulation. Une diminution de l'investissement sectoriel dans ces régions aura donc un effet de ralentissement plus fort que dans les économies les plus avancées puisqu'il concerne des gains annuels plus importants. La structure même de l'économie de ces régions est aussi pour une part responsable de différences observées en termes de ralentissement. La part du secteur industriel dans la formation de la valeur ajoutée y est plus importante que dans les économies de l'Annexe 1. Et ce secteur, dont la production est intensive en énergie, est plus fortement impacté par la mise en place de la taxe carbone que le secteur des services. L'effet de « grippage » du moteur de croissance se retrouve donc plus important dans ces régions.

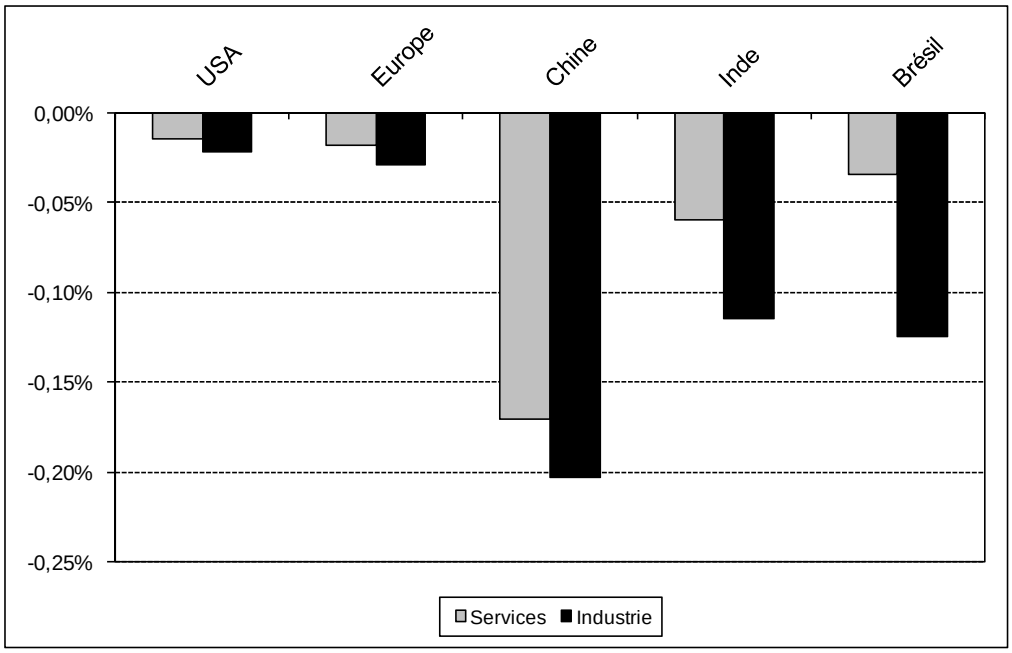


Figure 64 : Différence annuelle moyenne de taux de croissance de la productivité du travail pour les secteurs « industrie » et « services » dans le scénario *ETC_G* 450 ppmv par rapport à la référence.

L'effet de « grippage » du moteur de croissance que nous venons d'évoquer et qui s'observe, à des degrés différents, dans toutes les régions du modèle est à relier à l'impact des politiques climatiques sur la **formation et l'allocation de l'investissement** au sein du modèle. Il convient ainsi d'étudier l'importance relative de l'effet de volume et des effets d'éviction pour les résultats que nous obtenons, en sachant bien que plus l'effet d'éviction est fort, plus il aura une retombée sur la croissance et engendrera donc un effet de volume important.

La Figure 65 illustre l'importance relative de ces deux mécanismes dans la réduction, à l'échelle mondiale, du volume de capital disponible pour l'investissement dans les secteurs non énergétiques. Les politiques climatiques provoquent une réduction substantielle de ce volume par rapport à la référence qui peut atteindre au maximum 12.8 % et qui reste supérieure à 10% à partir des années 2030. Dans un premier temps, les effets de volume et d'éviction au profit des secteurs énergétiques sont de magnitudes voisines ; puis entre 2034 et 2046 l'effet d'éviction devient plus important ; ensuite, avec la réduction du coût en capital des technologies de décarbonisation, l'effet de volume prend le pas sur l'effet d'éviction.

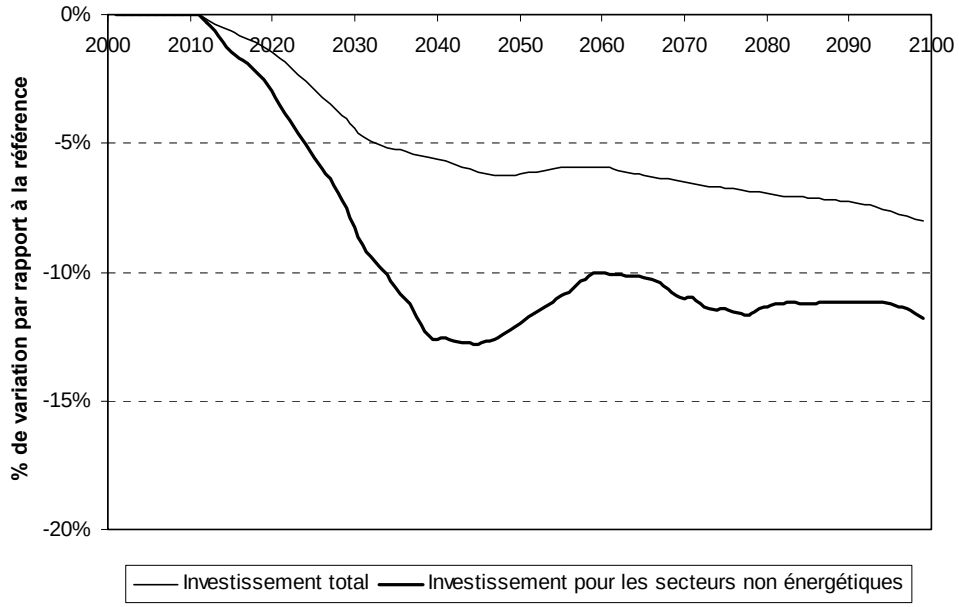


Figure 65 : Variation par rapport à la référence et à l'échelle mondiale (i) de l'investissement disponible pour les secteurs non énergétiques et (ii) de l'investissement total dans le scénario *ETC_G* 450 ppmv

Conclusion partielle

Cet exercice conduit à une conclusion pessimiste puisque, alors même que l'on attendait d'une modélisation de type *ETC_G* une baisse des coûts des politiques climatiques, on s'aperçoit que si cette baisse est bien réelle en ce qui concerne les « coûts énergétiques », c'est-à-dire l'ensemble des dépenses consacrées au secteur de l'énergie, il n'en est pas de même pour l'impact macro-économique global des politiques. Ce point est bien sûr décisif pour la conception des politiques climatiques.

En fait, de façon délibérée, l'exercice précédent surévalue cette « mauvaise surprise », que l'on ne peut atténuer qu'en jouant sur un certain nombre de paramètres clés, chacun d'entre eux devant faire l'objet d'une réflexion et de politiques spécifiques :

- Les effets de « *spillover* », de diffusion du progrès technique peuvent limiter les effets d'éviction : dans cette version du modèle, la croissance de la productivité dans un secteur et dans un pays donné dépend strictement des investissements effectués dans ce secteur, en ce même pays et ignore les effets de propagation du progrès technique entre les régions et les

secteurs. La question est donc de savoir dans quelle mesure cet effet de « *spillover* » peut contrebalancer les effets d'éviction et dans quelle mesure leur introduction permettrait de limiter les effets pervers que nous venons de mettre en évidence.

- Les efforts de R&D et de formation du capital humain sont associés à des dynamiques sectorielles particulières. En fait, si tel est bien la nature du problème posé, c'est-à-dire si on ne peut attendre de la simple induction du changement technique par les effets d'apprentissage, une réduction drastique des coûts des politiques climatiques, il convient alors de consacrer un budget plus important à l'activités de R&D, qui conduirait ainsi, non seulement à réduire l'effet d'éviction mais aussi à relancer la productivité générale dans une phase critique ou la politique climatique met en place des mécanismes qui conduisent à la ralentir.
- Le taux d'épargne des ménages et la part du profit des secteurs réinvestie jouent un rôle critique dans la formation de l'investissement. Nous avons raisonné jusqu'ici à valeur constante pour ces deux paramètres entre le scénario de référence et les scénarios de stabilisation. Passer le cap de la transition vers des sociétés à très faible intensité carbone sera facilité par une hausse du taux d'épargne, mais il faut bien tenir compte du fait que cette hausse ne saurait apporter des solutions miracles puisqu'elle signifie que dans un premier temps, il y ait une réduction de la consommation des ménages.

C'est sur l'ensemble de ces trois paramètres qu'il faut jouer pour gérer la transition vers une économie très faiblement intensive en carbone, et une description généralisée du progrès technique comme processus endogène montre que cette transition pourrait être plus difficile que ce que l'on pense généralement. Notre travail d'endogénéisation de la croissance économique démontre en effet que les modifications macroéconomiques engendrées par un objectif ambitieux de décarbonisation sont de grande ampleur et qu'elles peuvent **altérer le fonctionnement du moteur de croissance** des économies. Cela alerte donc sur la nécessité d'accompagner l'effort de décarbonisation du système énergétique par des **politiques d'innovation concernant les autres secteurs productifs** pour amortir un effet potentiel de « grippage » de la croissance. Cette nécessité est d'autant plus importante pour les économies émergentes qui devront déployer leurs efforts de décarbonisation dans une phase de rattrapage, fortement intensive en investissement. Cela nous renvoie à la question des transferts technologiques depuis les régions de l'Annexe 1 en faveur des économies émergentes associés à la mise en place d'une politique globale de réduction des émissions. Nos résultats laissent penser que ces transferts ne devraient pas concerner seulement les technologies de décarbonisation, mais aussi les autres secteurs productifs non énergétiques.

4 Changement structurel induit et politiques climatiques

Les résultats pessimistes que nous obtenons dans les scénarios *ETC_G* ne font en fait que signaler qu'en généralisant la démarche d'endogénéisation du changement technique aux secteurs non énergétiques, nous sommes forcés d'élargir, du point de vue des politiques, la vision que nous avons de cette induction. Jusqu'à maintenant, le concept d'induction est resté cantonné au progrès technique dans le secteur énergétique et derrière le pessimisme de nos conclusions, il n'y a que le

symptôme du fait que « décarboniser fortement » une économie nécessite de considérer que l'énergie n'est finalement qu'un secteur dépendant de toute la structure du développement. Et la décarbonisation ne peut être réussie qu'en jouant sur l'ensemble des paramètres qui déterminent cette structure.

Lorsque nous revenons au scénario *ETC* 450 ppmv, malgré une induction potentielle du progrès technique par les politiques climatiques, le niveau de taxe obtenu devient très élevé à partir de 2060, et provoque des pertes de PIB importantes. La suite de notre travail porte sur l'étude de ces résultats et sur la compréhension des phénomènes qui sont à leur origine, l'objectif étant d'en tirer des conclusions à même de contribuer à la réflexion portant sur les formes possibles que peut prendre l'action en faveur de la réduction des émissions de CO_2.

4.1 Au-delà de la taxe carbone

4.1.1 Un signal à l'efficacité marginale décroissante

L'effet de la taxe carbone sur le niveau global des émissions change fortement en fonction du temps et de sa valeur. L'effort que nous avons effectué dans le modèle IMACLIM-R pour hybrider une architecture d'équilibre général avec des spécificités techniques sectorielles fait apparaître simultanément (i) des réactions sectorielles non linéaires soumises à l'existence de seuils de déclanchement et d'asymptotes de saturation, (ii) des dynamiques de la demande finale qui sont influencées par la formation des revenus du travail et du capital, par les mécanismes de recyclage des revenus de la taxe, par les politiques d'infrastructures et par l'évolution du jeu des prix relatifs résultant de l'interaction entre les potentiels de décarbonisation sectoriels et le niveau des prix du carbone.

Afin de mieux comprendre les effets de la taxe carbone sur les systèmes techniques dans les scénarios *ETC*, nous utilisons dans cette sous-section et la suivante des simulations dans lesquelles différents profils de taxes linéaires entre 2010 et 2100 ont été testés. La Figure 66 illustre la répartition des potentiels de réduction en fonction de la valeur du CO_2. Ainsi à l'horizon 2100, une taxe de 140\$/tCO_2 permet de réduire l'intensité carbone du PIB mondial de 82% par rapport au scénario de référence mais lorsque l'on passe d'une taxe de 140\$/tCO_2 à une taxe de 280\$/tCO_2, la diminution de l'intensité carbone dans le second scénario par rapport au premier se limite à 32%, et entre une taxe valant 420\$/tCO_2 et une taxe valant 560\$/tCO_2 la réduction n'est plus que de 8%.

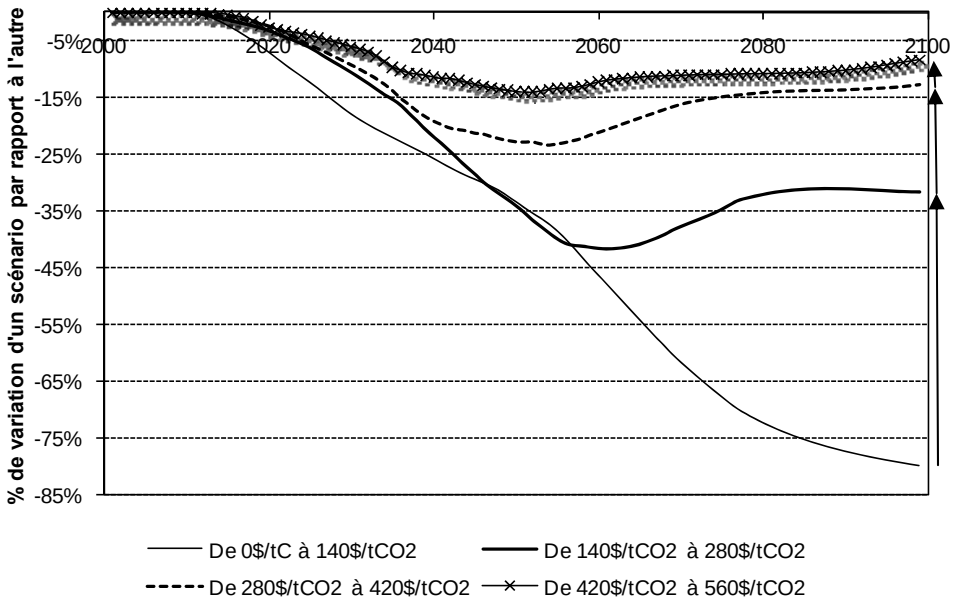


Figure 66 : Variation de l'intensité carbone du PIB mondial pour quatre couples de scénarios :
(i) entre la référence et un scénario avec une taxe linéaire valant 140$/tCO$_2$ en 2100
(ii) entre un scénario avec une taxe linéaire valant 140$/tCO$_2$ en 2100 et un avec une taxe valant 280$/tCO$_2$ en 2100
(iii)entre un scénario avec une taxe linéaire valant 280$/tCO$_2$ en 2100 et un avec une taxe valant 420$/tCO$_2$ en 2100
(iv) entre un scénario avec une taxe linéaire valant 420$/tCO$_2$ en 2100 et un avec une taxe valant 560$/tCO$_2$ en 2100

L'observation de ces courbes témoigne de l'existence de phénomènes de saturations techniques qui rendent le système énergétique de moins en moins réactif à une élévation du niveau de la taxe. A partir du moment où nous entrons dans ces domaines de valeur du carbone pour atteindre un objectif de stabilisation, l'action de la taxe dans le modèle se résume à une réduction absolue de l'activité, plus qu'à une réorientation des choix technologiques des agents. Ceci résulte de notre volonté d'améliorer le réalisme de la représentation des systèmes techniques dans notre structure de modélisation et ce résultat est simultanément lié (i) à l'absence de technologies dites « *backstop* », (ii) à l'existence d'asymptotes techniques sectorielles et (iii) à des contrastes sectoriels importants dans le niveau de réactivité à la taxe.

4.1.2 Le secteur des transports comme un point de blocage à la décarbonisation

La différence de réactivité à la valeur du CO_2 du secteur des transports par rapport aux autres secteurs de l'économie est particulièrement significative (Figure 67). En l'absence de vecteur énergétique de substitution aux carburants liquides, mais en présence de possibilités importantes d'amélioration de l'efficacité énergétique et de potentiels de production de biocarburants significatifs, l'augmentation de la valeur du CO_2 ne permet qu'une réduction très limitée des émissions de ce secteur. Un profil de taxe linéaire atteignant 140$/tCO$_2$ en 2100 ne conduit en effet qu'à une réduction de 10% des émissions totales de ce secteur sur la période 2001-2100 par rapport à la référence, alors que cette réduction atteint 60% dans le reste de l'économie. Une augmentation du niveau de la taxe jusqu'à une valeur de 560$/tCO$_2$, ne change pas significativement cet écart avec une réduction de 28% des émissions des transports contre 79% pour le reste de l'économie.

Pour comprendre ces résultats, nous devons séparer les dynamiques associées au transport de fret d'une part et au transport de passagers d'autre part.

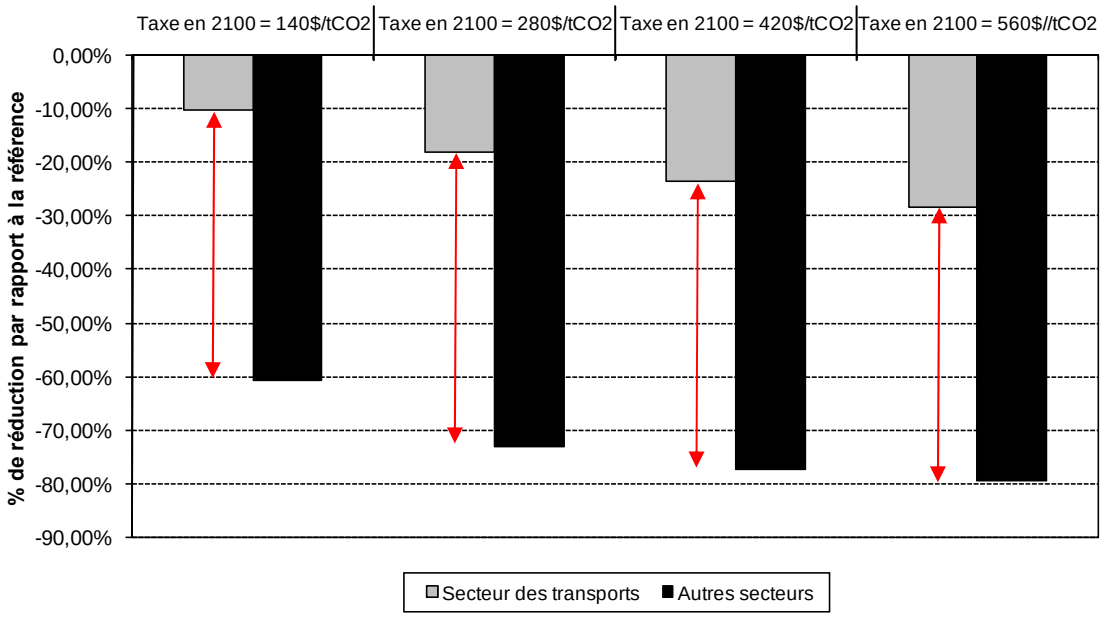


Figure 67 : Variation par rapport à la référence de la somme des émissions sur la période 2001-2100, attribuées au secteur des transports d'une part, et au reste de l'économie d'autre part, pour plusieurs profils linéaires de taxe

Les contenus en **transport de fret** des productions des secteurs industriels, agricoles et de services sont principalement déterminés par les décisions des agents quant à l'organisation spatiale de leur production et aux choix de leurs filières d'approvisionnement. Ces décisions dépendent de multiples facteurs qui ne sont que faiblement liés aux prix des transports tels que les différences régionales dans les coûts du travail, les processus de spécialisations industrielles ou encore les choix d'arbitrage à effectuer entre la sécurité de l'approvisionnement et le coût du stockage qui peuvent conduire à une organisation de la production selon le principe du « juste à temps ». L'information que nous possédons aujourd'hui sur la réactivité de ces paramètres à la mise en place d'une taxe carbone est très faible. Bien sûr, le niveau du prix final du transport de marchandise entre aussi en jeu dans ce processus de décision, cependant le lien entre le prix final du service de transport et la taxe carbone est loin d'être aussi direct que pour d'autres services énergétiques. Tout d'abord, les taxes existantes sur les carburants, si elles sont forfaitaires, tendent à amortir partiellement l'impact de la hausse du prix du carbone sur le prix final du carburant. Les potentiels de réduction de l'intensité énergétique du transport de fret routier *via* l'amélioration technologique du matériel roulant et les gains associés à l'optimisation du remplissage des camions, s'ajoutent au facteur précédent pour créer un **effet d'écran** vis-à-vis du signal de décarbonisation transmis aux secteurs par la taxe carbone. Tout cela est en plus amorti par la part importante des coûts non énergétiques dans la formation du prix du transport de fret qui inclut de plus en plus de valeur ajoutée associée à la fourniture des services de logistique. Dans les simulations obtenues avec les scénarios *ETC*, nous avons supposé que les déterminants non énergétiques poussant à l'intensification de la croissance en

transport, compensaient la tendance à la réduction liée à l'augmentation des prix du transport de fret. Ceci nous conduit à conserver constant le coefficient unitaire de consommation intermédiaire associé au transport dans la structure de coût de production des secteurs de l'agriculture, de l'industrie et des services. Malgré la mise en place de la taxe carbone, le système productif subit un phénomène de blocage dans une trajectoire de croissance intensive en transport. Cette situation conduit à un effet de volume important sur la production de transport de fret dont les émissions ne peuvent être réduites que par des gains d'efficacité sur les véhicules et une augmentation de la consommation de biocarburants.

Passons maintenant à la **demande de mobilité**. Le modèle IMACLIM-R prend en compte les **effets d'induction** de la mobilité associés à la construction de nouvelles infrastructures de transport (Litman, 2001). Ces dernières permettent en effet d'améliorer les vitesses de parcours des modes concernés et de diminuer leur coût complet. Pour un même budget de temps de transport, les ménages ont donc accès, grâce aux nouvelles infrastructures, à un bassin d'activité plus large. Ceci tend à modifier leurs modes de localisation en faveur d'une organisation des activités plus intensive en transport dans la mesure où ils peuvent choisir un lieu de travail plus éloigné de leur lieu de résidence ou bien éloigner leur lieu de résidence pour profiter par exemple de prix de l'immobilier plus faibles. Dans les scénarios *ETC*, la construction des nouvelles infrastructures suit l'évolution de la demande de transport distinguée par mode. Et même lorsque l'on applique une taxe carbone, ce mode de décision favorise à court et moyen terme les modes routiers et aériens. En effet, le prix final de ces services de transport n'est réellement modifié par la valeur du carbone que lorsque celle-ci est très élevée, d'autant plus qu'il existe des gisements importants d'efficacité énergétique qui jouent temporairement un rôle d'écran face à l'augmentation des prix du carbone. Nous retrouvons également dans les scénarios avec politiques climatiques le phénomène d'**effet rebond** touchant la demande de transport que nous avons observé dans le chapitre précédent et qui compense, par effet de volume, une partie de l'accélération du progrès technique induit par les politiques climatiques. A long terme, lorsque le prix du carbone est très élevé, ces modes restent tout de même attractifs du fait (i) de l'augmentation de la richesse des ménages qui conduit à une élévation de la valeur qu'ils donnent à leur temps et (ii) de la présence d'un réseau d'infrastructures très développé. Comme pour la consommation de transport de fret, nous retrouvons un effet de volume significatif qui compense partiellement les gains d'efficacité effectués sur les véhicules et la réduction du contenu carbone des carburants liée à une utilisation importante de la biomasse.

Par conséquent, ces dynamiques spécifiques associées au secteur des transports conduisent, contrairement aux autres secteurs de l'économie, à une trajectoire d'émission sectorielle qui ne réagit que faiblement au signal transmis par la taxe carbone. Les implications en termes de pertes de PIB et de prix du carbone associés à un objectif de stabilisation sont doubles. D'une part, la faible réactivité de ce secteur au signal prix conduit à une **augmentation importante du prix du carbone** requis par un objectif de stabilisation contraignant. Ces prix élevés du carbone pèsent sur les autres secteurs de l'économie à un moment où leur vitesse de décarbonisation est limitée par le taux de renouvellement du capital installé. D'autre part, les **autres secteurs doivent compenser** les faibles réductions d'émission accomplies par le secteur des transports par un effort supplémentaire. Ces mécanismes ont un rôle clé dans l'explication des résultats que nous avons présentés en section 3.1 sur la valeur du carbone et le coût de la stabilisation dans le scénario *ETC* 450 ppmv et nous confirmons ici les conclusions obtenues par Lecocq et al. (1998) avec un modèle plus compact.

4.2 Pour une vision élargie du changement structurel

La faible réactivité du secteur des transports à la taxe carbone nous renvoie à deux questionnements distincts. L'un concerne les **mécanismes de formation des coûts de la stabilisation**, l'autre le **contenu des politiques de réduction des émissions** de CO_2.
La section 3 de ce chapitre conclut que l'induction du changement technique par les politiques climatiques permet une réduction significative des coûts de la stabilisation mais ne conduit pas à un changement radical quant à leur ordre de grandeur : stabiliser la concentration atmosphérique de CO_2 à un niveau de 450 ppmv continue de coûter très cher. Il est dès lors légitime de vouloir vérifier si ces coûts élevés ne procèdent pas des dynamiques spécifiques observées dans le secteur des transports et si le débat mené autour de l'induction du changement technique par les politiques climatiques ne se doit pas d'être élargi à la notion de changement structurel induit qui englobe aussi bien un impact des politiques climatiques sur les évolutions technologiques que sur les politiques d'infrastructures, d'aménagement du territoire ou encore sur les préférences de consommation des ménages.
Nous nous sommes limités dans cette section à ne considérer qu'une modification des politiques de construction des infrastructures de transport qui serait induite par les politiques climatiques. L'exploration des conséquences liées à cette nouvelle spécification doit nous permettre aussi d'aborder la question des instruments requis pour atteindre un objectif ambitieux de limitation du changement climatique. Nous passons en effet d'un cadre de modélisation où le signal de décarbonisation n'est contenu que dans la valeur donnée au carbone, à un cadre où nous ajoutons à ce signal l'instrument spécifique des politiques d'infrastructure qui a vocation à agir principalement sur le secteur des transports.

4.2.1 Stabilisation climatique et politiques d'infrastructures

Les décisions en matière d'investissement dans les infrastructures de transport ne sont que partiellement liées aux prix finaux des énergies et leur rôle structurant en matière d'aménagement du territoire leur donne un statut particulier dans le processus de décision politique. Les divers modes de financement qui leur sont associés peuvent varier en fonction des régions (financement public, partenariat public-privé) et complexifient encore les cadres institutionnels dans lesquels se définissent les politiques d'infrastructures.
Dans les sections qui suivent nous avons ajouté à notre modélisation un lien entre les politiques climatiques et la planification des infrastructures de transport. Cependant notre dessein est en partie de raffiner la représentation d'une réalité qui a été jusqu'à présent négligée dans les modèles mais aussi de considérer les politiques d'infrastructure comme un levier de commande supplémentaire, qui s'ajoute à la taxe carbone, pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Ce faisant, nous étudions la possibilité, pour atteindre un objectif climatique, de jouer sur le stock de capital qui est caractérisé par Jaccard et al. (1997) comme ayant l'inertie d'évolution la plus importante.
Nous nous intéressons donc à un nouveau cadre de modélisation que nous nommons *ETC_I* et dans lequel le déclanchement des politiques climatiques est associé à une réorientation des politiques

d'infrastructures de transport. Cette spécification s'applique à toutes les régions du modèle et concerne aussi bien le transport de fret que le transport de passagers.

Pour le **transport de fret**, nous supposons que la mise en place d'une politique climatique s'accompagne d'une série de mesures ou de comportements qui jouent en faveur (i) d'une réduction de l'intensité en transport de la croissance et (ii) d'un report modal en faveur des modes ferroviaires, fluviaux ou maritimes pour les trafics intracontinentaux. Ces mesures se traduisent par une réorientation, depuis le mode routier, des investissements d'infrastructure en faveur de ces modes pour créer un réseau attractif. Elles supposent aussi un effort particulier d'articulation des échanges intermodaux afin de limiter l'utilisation du mode routier à la desserte finale, là où la compétitivité des autres modes est nécessairement réduite. A cela s'ajoute une politique d'aménagement du territoire visant à favoriser la concentration des processus de production.
Cette série de mesures se traduit dans le modèle par une modification des coefficients de consommation intermédiaire unitaire de transport par les autres secteurs de production. Afin de tenir compte de l'inertie importante qui caractérise ces évolutions, ces modifications ne concernent que la structure de coût de production des nouvelles générations de capital et ne commencent qu'à partir de 2020, malgré une mise en place des mesures incitatives concomitantes avec le début de l'application de la taxe carbone en 2010. En l'absence de données robustes sur les potentiels de réduction associés à ces mesures, nous avons adopté des gains annuels sur les nouvelles générations de capital égaux aux taux régionaux d'amélioration autonome de l'efficacité énergétique (*cf.* chap. 3, section 5.2.1). L'intensité énergétique du secteur « autres transports » qui rassemble les transports de fret et de passagers routiers et ferroviaires, est aussi modifiée pour traduire une augmentation de la part du sous-secteur ferroviaire à l'intérieur de ce secteur au détriment du sous-secteur routier. Ceci se traduit par une élasticité prix de la consommation unitaire de carburants liquides qui augmente en valeur absolue pour les choix technologiques des nouveaux équipements.

Les mesures concernant le **transport de passagers** touchent à la fois les trafics à courte, moyenne et longue distance. A courte et moyenne distance, des potentiels importants de réduction des émissions du secteur existent *via* (i) des reports modaux en faveur des modes doux (transport en commun, modes non motorisés) et (ii) une réduction des besoins de mobilité associée principalement à une réduction de la distance moyenne de déplacement. Les choix d'infrastructures jouent simultanément sur ces deux paramètres. En effet, le fait de favoriser la construction de réseaux de transport en commun et de limiter les infrastructures routières conduit sur le long terme à une densification des zones urbaines qui elle-même augmente la compétitivité des modes peu intensifs en carbone en même temps que les distances moyennes de parcours sont réduites. Nous supposons ici que les choix d'infrastructures de transport s'accompagnent d'une réglementation d'aménagement du territoire cohérente qui favorise simultanément la densification urbaine, la mixité des activités et une conception de l'espace public urbain favorisant les modes non motorisés.
Le cas du transport de longue distance est différent selon que l'on considère les déplacements intracontinentaux inférieurs à 2000 kilomètres ou bien ceux qui sont effectués sur une distance supérieure à 2000 kilomètres ou qui impliquent la traversée d'une surface maritime. Pour les premiers, des potentiels de substitution existent en faveur du mode ferroviaire à grande vitesse et nous supposons dans le scénario *ETC_I* qu'ils sont exploités. Pour les seconds, il n'existe pas de mode de substitution au transport aérien mais des trafics peuvent être évités *via* l'utilisation de

moyens de communication tels que la téléconférence ; nous considérons ici que ces pratiques se développent.
Toutes ces mesures se traduisent dans le modèle par une modification de l'évolution de la capacité associée à chaque mode de transport qui détermine, lors du programme de maximisation de l'utilité, leur compétitivité en matière de vitesse et de disponibilité. La construction des infrastructures de transport ne suit plus l'évolution de la demande, mais est caractérisée par une dynamique volontariste qui tient compte de la mise en place de la politique climatique. Les modes aériens et automobiles sont ainsi défavorisés au profit du transport en commun.

Avec les nouvelles spécifications que nous avons introduites dans le cadre *ETC_I*, nous avons simulé des scénarios de stabilisation avec les mêmes objectifs que dans les scénarios précédents (550 ppmv et 450 ppmv). Notre objectif est d'évaluer les réductions de coût potentielles obtenues suite à la mise en place d'une politique climatique utilisant des signaux spécifiques pour quelques secteurs clés en plus d'une taxe carbone généralisée.

4.2.2 Multiplication des signaux et coût de la stabilisation

Des politiques d'infrastructures cohérentes avec les politiques climatiques modifient fortement, par rapport aux scénarios *ETC* et *ATC,* le profil de taxe requis pour atteindre un objectif de stabilisation à 450 ppmv (Figure 68). Durant toute la trajectoire, la valeur du carbone, dans le scénario *ETC_I,* est inférieure à celle des scénarios *ATC* et *ETC* mais les différences les plus marquées apparaissent après 2060, au moment où les prix « explosaient » dans les scénarios *ATC* et *ETC*. En effet, dans les deux derniers scénarios, la valeur du carbone connaît, à partir de cette date, une période de croissance très vigoureuse qui la mène à des valeurs supérieures à 900$/t$CO_2$ en fin de période, alors qu'elle reste contenue dans le scénario *ETC_I* (le prix du CO_2 passe de 98 $/t à 248 $/t en quarante ans). Ces résultats confirment le rôle clé des transports dans le processus de décarbonisation. Peu réactifs au signal transmis par la taxe carbone, ils conduisent, en l'absence de politiques spécifiques, à la nécessité d'imposer, en fin de période, un niveau de taxe très élevé pour atteindre un objectif de stabilisation à 450 ppmv. Des politiques d'infrastructures spécifiques œuvrant en faveur de la décarbonisation de l'activité permettent de lever l'obstacle formé par le secteur des transports en contrôlant les dynamiques de volume propres à ce secteur qui compensent le bénéfice des innovations technologiques induites par les politiques climatiques.

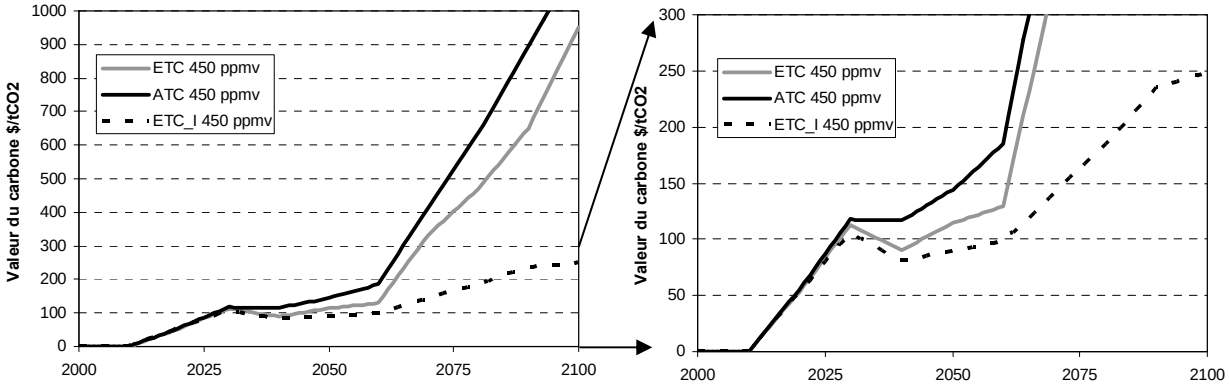


Figure 68 : Valeur du carbone dans les scénarios *ETC* 450 ppmv, *ATC* 450 ppmv et *ETC_I* 450 ppmv sur la période 2001-2100 (graphe de gauche), zoom des mêmes trajectoires sur les valeurs du carbone inférieures à 300 $/tCO$_2$ (graphe de droite)

En termes de coût macroéconomique, les pertes sont plus réduites dans les scénarios *ETC_I*, par rapport au cadre *ETC*, lorsque le niveau de stabilisation des concentrations diminue (Figure 69). Ceci souligne le risque que représente un développement non maîtrisé de la mobilité des biens et des personnes pour la nécessité de limiter l'ampleur du changement climatique. En effet, un traitement non spécifique du secteur des transports dans les années à venir conduirait à une croissance très intensive en transport qui hypothèquerait ensuite fortement la possibilité d'atteindre des objectifs de stabilisation à des niveaux inférieurs ou égaux à 450 ppmv avec un coût raisonnable. A mesure que l'objectif de stabilisation devient plus contraignant, le secteur des transports devient un obstacle de plus en plus coûteux à franchir pour atteindre cet objectif.

Si l'on se concentre sur un objectif de stabilisation à 450 ppmv, les coûts à l'échelle mondiale sont réduits d'un montant proche de 1.4% du PIB actualisé de référence par les mesures de réorientation des politiques d'infrastructures contenues dans le scénario *ETC_I*. Ce chiffre est à comparer à la réduction des pertes de 0.8% du PIB actualisé de référence, obtenue grâce à la prise en compte de l'induction du changement technique par les politiques climatiques dans les scénarios *ETC,* par rapport aux scénarios *ATC*. Ces résultats suggèrent donc que pour une stabilisation des concentrations à des niveaux exigeants et en l'absence de technologies « *backstop* », les coûts des politiques climatiques seront plus influencés par les choix effectués pour les infrastructures des transports que par la réorientation du changement technique en faveur des technologies peu ou pas intensives en carbone.

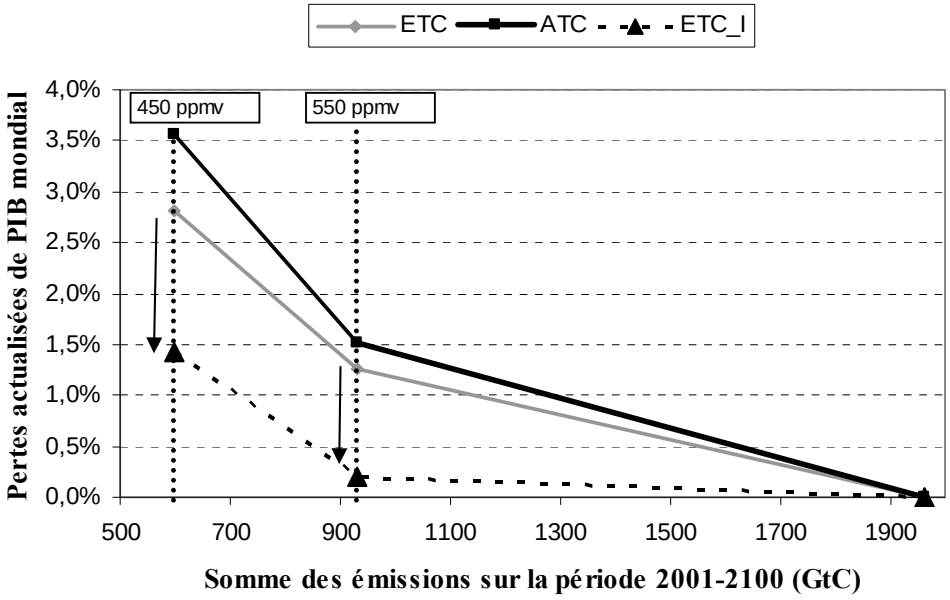


Figure 69 : Valeur des pertes actualisées de PIB mondial (par rapport à la référence) face à la somme des émissions sur la période 2001-2100 (GtC), scénario *ATC*, *ETC* et *ETC_I*

A l'échelle régionale, les bénéfices provenant d'une réorientation des choix d'infrastructures de transports permettent de réduire les coûts de la stabilisation pour les régions Annexe 1 à un niveau inférieur à 1% du PIB actualisé de référence (Tableau 19). Le coût de la stabilisation reste cependant élevé dans les régions non Annexe 1 malgré la réorientation des politiques d'infrastructures. Ces résultats s'expliquent principalement par la différence qu'il existe entre le tempo de formation des pertes de PIB et le temps caractéristique d'évolution des réseaux d'infrastructures de transport.

	ATC	**ETC**	**ETC_I**
	450 ppmv	**450 ppmv**	**450 ppmv**
Pertes actualisées de PIB réel mondial	3,55%	2,81%	1,43%
Pertes actualisées de PIB réel Annexe 1	1,83%	1,47%	0,60%
Pertes actualisées de PIB réel non Annexe 1	7,00%	5,49%	3,07%

Tableau 19 : Coûts de la stabilisation pour un objectif de stabilisation à 450 ppmv, comparaison des scénarios *ETC*, *ATC* et *ETC_I*

Du fait de la très grande **inertie** caractérisant les systèmes considérés (forme des villes, localisations industrielles), les politiques d'infrastructures ne jouent qu'à long terme sur le contenu carbone des économies. Et, si le secteur des transports apparaît comme un obstacle à l'atteinte d'un objectif de stabilisation à 450 ppmv, c'est surtout au cours de la deuxième moitié du XXI^{eme} siècle que sa faible réactivité pèse sur le processus de décarbonisation, au moment où les gisements de réduction les plus accessibles commencent à être épuisés. Conformément à ce que nous avons observé sur les profils de taxe, les réductions de pertes de PIB qui découlent, dans les scénarios *ETC_I*, d'une induction spécifique du changement structurel par les politiques climatiques interviennent surtout sur la deuxième moitié du XXI^{eme} siècle (Figure 70).

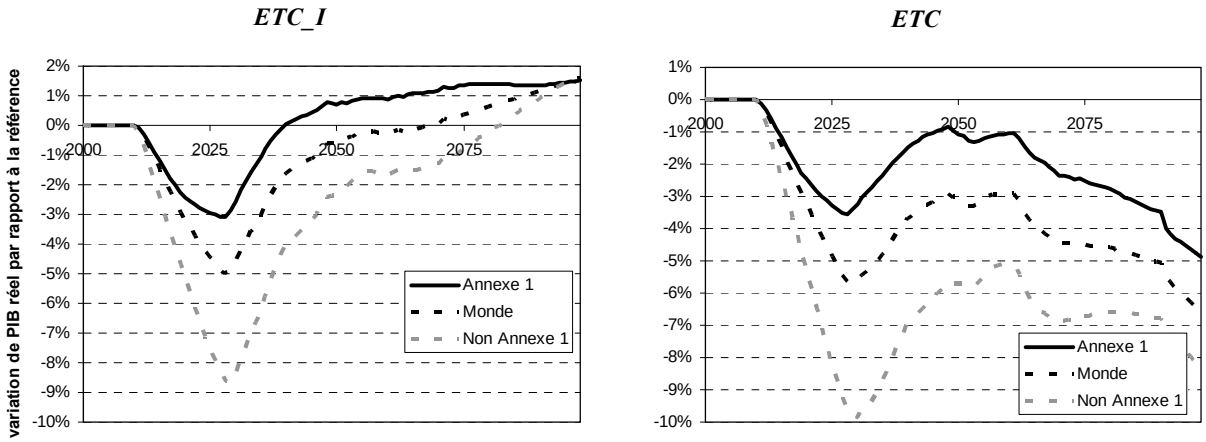


Figure 70 : Profil temporel des variations de PIB réel par rapport à la référence pour trois agrégats régionaux différents (Monde, Annexe 1, non Annexe 1), scénarios *ETC_I* 450 ppmv et *ETC* 450 ppmv

Dans les scénarios *ETC 450* ppmv et *ETC_I* 450 ppmv, la relation entre le niveau de taxe carbone et l'étendue des pertes de PIB n'est **ni linéaire ni homogène au cours du temps**. Sous les deux spécifications, le profil temporel des pertes est caractérisé, avant 2050, par des pertes transitoires importantes suivies d'une période où les économies rattrapent le retard qu'elles ont accumulé par rapport à la croissance de référence. A court et moyen terme, la réorientation des politiques d'infrastructures ne change pas radicalement le profil des pertes même si elle permet de réduire l'ampleur du ralentissement transitoire associé à la mise en place de la taxe carbone. La situation change au cours de la seconde moitié du XXI^{eme}, au moment où la réorientation des politiques d'infrastructures produit son effet vertueux dans le scénario *ETC_I* alors que les dynamiques incontrôlées du transport pèsent sur la croissance dans le scénario *ETC*. Ainsi, tandis que le phénomène de rattrapage perd de l'ampleur et s'inverse dans le scénario *ETC* à partir des années 2060, cette dynamique reste vigoureuse dans le scénario *ETC_I* et on obtient en 2100 un PIB mondial plus grand que dans la référence (+1.52% pour les régions de l'Annexe 1 et +1.65% pour les régions non Annexe 1). Ceci contraste fortement avec les résultats obtenus dans le scénario *ETC* où la richesse en 2100 reste globalement inférieure à celle obtenue en référence avec des pertes plus marquées dans les régions hors Annexe 1 (-8.6%) que pour les autres économies plus avancées (-5%).

Dans ce contexte, **les pertes de PIB transitoires** qui se forment à moyen terme (à l'horizon 2030) influent fortement sur les résultats que nous obtenons en termes de coût actualisé. Ces pertes

transitoires ne sont que faiblement réduites par la réorientation des politiques d'infrastructures de transport et elles sont, dans les deux scénarios, beaucoup plus importantes pour les régions émergentes que pour celles de l'Annexe 1. En effet, à court et moyen terme, l'impact important de la taxe sur la croissance des régions non Annexe 1 est le fruit de plusieurs facteurs concordants :

- La mise en place de la politique carbone intervient à un moment où la croissance économique est forte, un ralentissement de celle-ci a donc un impact plus important sur le volume du PIB ;
- Leur PIB est initialement plus intensif en carbone du fait (i) d'un système de transformation énergétique peu efficace et fondé sur l'utilisation du charbon, (ii) d'équipements de consommation finale peu efficaces et (iii) d'une part importante des industries intensives en énergie dans la formation de la valeur ajoutée ;
- La structure initiale de la croissance économique, dans ces régions, repose fortement sur les exportations or les revenus qui y sont associés diminuent avec l'instauration de la taxe carbone du fait (i) d'une perte de compétitivité que subissent les biens exportés liée à l'intensité carbone élevée de leur production, (ii) d'une réduction en volume de la consommation mondiale de bien industriels associée à l'accélération du phénomène de dématérialisation des économies induit par la taxe et (iii) d'une réduction générale de la consommation de matières premières, en particulier de pétrole et de charbon, que ces régions exportent massivement dans la référence.

Finalement, le Tableau 20 compare l'impact des politiques climatiques sur le taux de croissance annuel moyen du PIB dans les scénarios *ETC* 450 ppmv et *ETC_I* 450 ppmv. Nous retrouvons dans ce tableau la période de ralentissement transitoire qui apparaît au début de la mise en place des politiques dans les deux scénarios considérés (période 2010-2030). Au cours de cette phase, les pertes de taux de croissance sont, en absolu, plus importantes dans les régions non Annexe 1 que dans celles de l'Annexe 1 mais, comparativement aux taux de croissance dans la trajectoire de référence, l'ordre de grandeur de ces pertes redevient comparable pour ces deux régions. Sur la période 2030-2050, nous pouvons observer dans les deux scénarios une ré-accélération de la croissance dont la magnitude est, dans le scénario *ETC_I* 450 ppmv, comparable à celle du ralentissement subi par les économies sur la période 2010-2030. Les différences de dynamique entre les scénarios *ETC* 450 ppmv et *ETC_I* 450 ppmv apparaissent réellement sur les périodes 2030-2050 et 2050-2100. En effet au cours la première des deux périodes, la ré-accélération de la croissance par rapport à la référence est plus marquée dans le scénario *ETC_I* que dans le scénario *ETC* et, au cours de la seconde, le taux de croissance annuel moyen reste supérieur à celui de la référence dans le scénario *ETC_I* alors qu'il redevient inférieur dans le scénario *ETC*.

	Taux de croissance annuel moyen du PIB réel								
	Période 2010-2030			**Période 2030-2050**			**Période 2050-2100**		
	Référence	Différence par rapport à la référence		Référence	Différence par rapport à la référence		Référence	Différence par rapport à la référence	
		ETC	*ETC_I*		*ETC*	*ETC_I*		*ETC*	*ETC_I*
Monde	3.10%	-0.30%	-0.26%	2.33%	0.14%	0.22%	1.70%	-0.079%	0.04%
Annexe 1	2.22%	-0.18%	-0.15%	1.62%	0.13%	0.18%	1.49%	-0.084%	0.02%
non Annexe 1	5.35%	-0.54%	-0.48%	3.44%	0.23%	0.34%	1.95%	-0.062%	0.08%

Tableau 20 : Comparaison des taux de croissance annuels moyens du PIB réel pour les scénarios de référence, *ETC* 450 ppmv et *ETC_I* 450 ppmv, sélection de régions et de périodes

Conclusion partielle

En définitive, l'accélération et la réorientation du progrès technologique induites par les politiques climatiques ont la possibilité de conduire sur le long terme à une trajectoire de croissance moins intensive en énergie, plus dématérialisée et finalement plus prospère que dans la trajectoire de référence. Cependant, les émissions mal contrôlées du secteur des transports nécessitent dans le scénario *ETC,* de donner, en fin de période, une valeur très élevée au carbone pour éviter un redémarrage de ses émissions. Le niveau atteint par la taxe pèse alors sur l'activité économique. Cette situation ne se retrouve pas dans le scénario *ETC_I* où la modification des politiques d'infrastructures associée à la politique carbone permet de lever le verrou à la décarbonisation que constitue le secteur des transports. L'adjonction de ces politiques spécifiques à la taxe carbone permet de diminuer fortement son niveau sur la seconde moitié du XXI^{eme} siècle et donne par conséquent la possibilité aux économies de profiter des progrès induits par les politiques climatiques sur les technologies de transformation et d'usage final de l'énergie.

De plus, le scénario *ETC_I* attire notre attention sur l'importance d'un mécanisme clé dans la formation des coûts de la stabilisation à 450 ppmv, à long terme. Malgré une part associée au transport de fret qui est assez faible dans les coûts de production, le fait de supposer constant ou non le cœfficient de consommation unitaire associé au transport pour les secteurs productifs influe fortement sur le niveau des pertes en fin de période. Les études sectorielles sur l'éventuelle réaction du contenu en fret de la croissance à une politique climatique n'attirent, aujourd'hui, qu'un effort de recherche assez faible (*cf.* Kahn Ribeiro et *al.*, 2007). Cet exemple est une illustration typique du bénéfice que l'on peut tirer d'une structure de modélisation qui étend les potentiels de dialogues interdisciplinaires et dans laquelle l'analyse de type « *top down* » aide à détecter des éléments clés qui n'apparaissent pas dans les structures de modélisation classiques fondées sur l'utilisation de

fonctions de production, et qui n'ont jusqu'à présent reçu que peu d'attention de la part des études sectorielles analysant les stratégies de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Conclusion

Ce chapitre a proposé une première évaluation des leçons à tirer d'une modélisation endogène du changement structurel, pour les politiques climatiques. Les résultats que nous avons obtenus dans ce travail sont de deux types :

Tout d'abord le concept d'induction du progrès technique par les politiques climatiques a été élargi au-delà du cadre habituel que constitue le secteur énergétique, au changement technique qui concerne l'ensemble des secteurs de production. Les résultats obtenus pour cet exercice alertent sur la nécessité de prendre en compte les interactions entre les politiques climatiques et l'amélioration de la productivité des facteurs de production non énergétiques. En effet, dans un cadre de modélisation élargi, l'habituel optimisme qui découle, dans la littérature, de l'endogénéisation du progrès technique pour le secteur énergétique doit être révisé puisque, en l'absence de politiques d'accompagnement spécifiques, nous obtenons des pertes de richesse plus importantes lorsque la direction et la vitesse du progrès technique sont endogènes que lorsqu'elles sont exogènes.

Par ailleurs, nous avons effectué une première tentative pour hybrider l'analyse en équilibre général avec des informations technologiques sectorielles mais aussi avec des éléments touchant aux dynamiques spatiales. Nous nous sommes focalisés pour ce dernier point sur les liens entre les politiques d'infrastructures et la consommation de transport. Dans ce cadre, l'étude de nos scénarios de stabilisation à 450 ppmv démontre finalement que l'induction du changement technique dans le seul secteur énergétique ne permet pas de réduire fondamentalement le coût de la stabilisation. Cette induction donne cependant de nouvelles marges de manœuvre qui sont malheureusement compensées partiellement par des dynamiques sectorielles spécifiques. L'adjonction au signal prix fourni par une taxe carbone de politiques de réorientation des infrastructures de transport permet de profiter complètement de ces nouvelles marges de manœuvre. Ainsi, l'orientation, à l'aide de politiques d'infrastructures adéquates, des systèmes de transport vers des trajectoires de développement plus soutenables conduit à réduire sensiblement le coût d'un objectif de stabilisation à 450 ppmv. Et l'ordre de grandeur de cette réduction dépasse le bénéfice apporté par l'accélération du changement technique par les politiques climatiques.

Enfin, quelques enseignements quant à la forme du futur cadre international de réduction des émissions de CO_2 peuvent être tirés de nos résultats. Notre travail souligne la nécessité de ne pas laisser à la seule taxe carbone le soin de transmettre l'intégralité du signal de décarbonisation aux économies. Une mise en place rapide, en parallèle de la taxe, de politiques réorientant la construction des infrastructures de transport évite de buter à long terme sur un verrou coûteux à surmonter pour atteindre un objectif de stabilisation à 450 ppmv. Si cette diversification du signal permet d'obtenir une trajectoire de croissance associée au scénario de décarbonisation qui dépasse celle de la référence à l'horizon 2100, il n'en reste pas moins que les principales pertes causées par les politiques climatiques ont lieu à court et moyen terme dans les régions non Annexe 1, à un moment où le prix du carbone n'est pas trop élevé. Ces résultats soulignent la nécessité de trouver des mécanismes internationaux de compensation pour amortir le choc de court terme provoqué par

la politique de décarbonisation dans ces régions mais aussi de déterminer des modes d'action supplémentaires (qui n'ont pas été explorés dans notre travail) pour faciliter le franchissement par les économies de la période critique des premières décennies suivant la mise en place des politiques de réduction des émissions.

Bibliographie

Anderson, D., Cavendish, W, 2001, "Dynamic simulation and environmental policy analysis: beyond comparative statics and the environmental Kuznets curve", *Oxford Economic Papers*, vol. 53, pp. 721-746.

Fisher, B.S., N. Nakicenovic, K. Alfsen, J. Corfee Morlot, F. de la Chesnaye, J.-Ch. Hourcade, K. Jiang, M. Kainuma, E. La Rovere, A. Matysek, A. Rana, K. Riahi, R. Richels, S. Rose, D. van Vuuren, R. Warren, 2007, "Issues related to mitigation in the long term context", *In Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Inter-governmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Ghersi F., Hourcade J.-C., 2006, Macroeconomic consistency issues in E3 modeling: the continued fable of the elephant and the rabbit, *The Energy Journal*, 27 (Special Issue n°2: *Hybrid Modeling of Energy-Environment Policies: Reconciling Bottom-up and Top-down*), pp 27-49.

Grubb, M., 1997, "Technologies, energy systems and the timing of CO2 emissions abatement: An overview of economic issues", *Energy Policy*, Volume 25, Issue 2, pp. 159-172.

Grubb, M., Carraro, C., Schellnhuber, J., 2006, "Technological Change for Atmospheric Stabilization", *The energy journal*, volume 27, pp. 1-16

Jaccard, M., Failing, L., Berry, T., 1997. "From equipment to infrastructure: community energy management and greenhouse gas emission reduction". *Energy Policy* 25 (11), pp.1065–1074.

Kahn Ribeiro, S., S. Kobayashi, M. Beuthe, J. Gasca, D. Greene, D. S. Lee, Y. Muromachi, P. J. Newton, S. Plotkin, D. Sperling, R. Wit, P. J. Zhou, 2007, "Transport and its infrastructure". In *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Lecocq F., Hourcade J.C., Ha-Duong M.,1998, "Decision making under uncertainty and inertia constraints : sectoral implications of the when flexibility", *Energy Economics* 20(5/6), pp 539-555.

Litman, T., 2001, "Generated Traffic; Implications for Transport Planning," *ITE Journal*, Vol. 71, No. 4, April, 2001, pp. 38-47. www.vtpi.org/gentraf.pdf, accédé le 21/04/2008,.

Sims, R.E.H. , R.N. Schock, A. Adegbululgbe, J. Fenhann, I. Konstantinaviciute, W. Moomaw, H.B. Nimir, B. Schlamadinger, J. Torres-Martínez, C. Turner, Y. Uchiyama, S.J.V. Vuori, N. Wamukonya, X. Zhang, 2007, "Energy supply", *In Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Weyant, J.P. (ed.), 2004, "EMF 19 alternative technology strategies for climate change policy". *Energy Economics*, **26**(4), pp. 501-755.

Conclusion

Dans cette thèse, nous avons exploré les conséquences du passage d'une économie du changement climatique sous tendue par une vision exogène du progrès technique à une économie dans laquelle les évolutions technologiques sont induites par l'ensemble des signaux économiques, en particulier les politiques climatiques.

Au point de départ de notre réflexion était la conviction qu'il était nécessaire d'élargir le cadre généralement adopté dans les modèles pour traiter du débat « progrès technique autonome *vs* progrès technique induit ». En effet, le cadre de l'induction est, dans la quasi-totalité des cas, cantonné au secteur énergétique et les évaluations sont menées sans bouclage macroéconomique des trajectoires dans les modèles en équilibre partiel ou bien avec un bouclage, mais dans des modèles macroéconomiques qui présentent un degré d'agrégation élevé. Nous nous proposions donc de ne plus considérer l'induction du progrès technique dans le seul secteur énergétique mais d'élargir son cadre au changement structurel, entendu comme résultante d'interactions endogènes entre les évolutions des potentiels techniques, des styles de consommation et des choix de localisation.

Au fondement de cette conviction, et la thèse démontre sa véracité, réside l'intuition que, lorsque l'on se place dans des trajectoires de stabilisation des concentrations de CO_2 à des niveaux exigeants, l'on se retrouve loin du paradigme symbolisé par la fable du ragoût d'éléphant et de lapin chère à A. Manne (*cf.* chapitre 1, section 2.2) dans laquelle le poids du lapin (l'énergie) est trop faible pour compenser le goût de l'éléphant (le reste de l'économie). Contrairement à ce que suggère cette fable, il devient de plus en plus impossible de travailler sous une hypothèse de neutralité entre le fonctionnement du moteur de la croissance d'une part et d'autre part le changement technique, entendu comme l'évolution même du contenu matériel des modes de développement.

Pour répondre à ces questionnements, nous avons construit une nouvelle structure de modélisation (le modèle IMACLIM-R) à même d'hybrider l'analyse en équilibre général avec des informations sectorielles spécifiques. Nous avons opté, dans ce modèle, pour une architecture nouvelle visant à rompre avec une représentation des systèmes techniques reposant sur l'utilisation systématique de fonctions de production aux formes mathématiques prescrites qui ne peuvent garantir le réalisme technique des économies projetées dès lors que l'on s'éloigne par trop de l'équilibre de référence. Au lieu de cela, nous considérons que les fonctions de production statiques sont de type *clay-clay* c'est-à-dire qu'elles représentent l'impossibilité de changer instantanément d'équipement mais que les coefficients techniques sont modifiés au cours du temps. Cette modification s'opère entre deux équilibres en fonction des informations renvoyées par des modèles dynamiques sectoriels qui sont soumis aux incitations économiques (prix, volumes de financement etc.) résultant des équilibres précédents. En d'autres termes, nous endogénéisons bien la transformation des fonctions de production et ceci de façon contrôlable par des données d'ingénieur.

Cette nouvelle structure a démontré sa flexibilité à intégrer diverses spécificités sectorielles dans les analyses que nous avons menées, en particulier celles résultant des inerties socio-techniques et nous avons contribué à y incorporer deux innovations qui ne se retrouvent pas, jusqu'à présent, dans les autres modélisations hybrides :

- La formation de la demande de transport tient compte des substitutions modales et résulte des interactions endogènes entre le prix des carburants, les potentiels de progrès techniques

sur les véhicules, l'évolution de la richesse des ménages et de leurs préférences et enfin les politiques d'infrastructures. De ce fait, nos scénarios intègrent les effets rebonds qui touchent la demande de mobilité suite à une amélioration technologique des véhicules mais aussi, de façon stylisée, les effets d'induction des politiques d'infrastructures sur la consommation de transport et l'effet structurant de ces mêmes politiques sur les modes d'organisation spatiale des activités.

- L'évolution de la production pétrolière est limitée par les contraintes géologiques pesant sur la vitesse de mise à disposition des réserves. En incorporant schématiquement les limites à la disponibilité temporelle des réserves de pétrole découlant de l'interaction entre les processus d'exploration, de mise en production et de déplétion de ces réserves, nous sommes capables de représenter plus finement les potentiels d'évolution de l'offre pétrolière face à la croissance de la demande et donc de prendre en compte de manière endogène, dans nos scénarios, les interactions qui existent entre le niveau et l'intensité matérielle de la croissance économique, la formation des prix du pétrole et la vitesse du progrès technique dans le secteur énergétique.

Les expériences numériques menées dans cette thèse à travers IMACLIM-R ont produit un ensemble de résultats qui permettent de donner un éclairage nouveau sur le débat concernant l'induction du changement technique dans les modèles du changement climatique :

Le premier éclairage concerne les **trajectoires de référence**. On peut certes remarquer que nous concluons à la plausibilité de scénarios à niveaux d'émission plus élevés que ceux qui sont retenus par le GIEC mais, du point de vue méthodologique, le point important nous paraît être la possibilité de discuter des trajectoires d'émissions non pas comme le simple résultat d'une combinatoire d'hypothèses mais comme le déploiement de mécanismes endogènes. Or, il se trouve que ces mécanismes jouent ici plutôt en faveur de phénomènes de bifurcation vers des trajectoires très intensives en carbone. Cette mise en évidence est rendue possible par un cadre de modélisation qui prend en compte, de façon endogène, les interactions entre potentiels de progrès technique, structure de la demande finale des ménages et choix de localisation. Parmi eux, nous faisons une distinction entre des effets de système qui visent à limiter, par interactions négatives réciproques, la réalisation simultanée de plusieurs potentiels sectoriels de réduction d'émission ; et des dynamiques qui viennent contrebalancer certaines améliorations techniques potentielles (par exemple, l'effet rebond dans les transports). Ces résultats restent bien sûr sensibles à un certain nombre d'incertitudes paramétriques, ils démontrent cependant la capacité du modèle à prendre en compte des mécanismes de rétroaction endogènes qui éloignent la production de scénarios de prospective d'un simple exercice de combinaison d'hypothèses exogènes.

Nos travaux sur les **scénarios avec politiques climatiques** mettent ensuite en lumière l'existence d'un *hiatus* entre l'optimise qui était originellement attaché à la prise en compte d'une induction du changement technique par les politiques climatiques (« cette induction permet de réduire les coûts des politiques ») et les résultats que nous obtenons :

- La prise en compte de l'induction du progrès technique par les politiques climatiques dans le seul secteur énergétique permet de réduire les coûts de la stabilisation par rapport à un

cadre de modélisation qui considère le processus d'innovation dans ce secteur comme indépendant des conditions de marché. Nous retrouvons en cela les résultats généralement produits dans la littérature.

- Mais, cette conclusion s'inverse lorsque la représentation endogène du progrès technique est étendue aux autres secteurs de l'économie. Nous démontrons ainsi que la démarche habituellement adoptée par les modélisateurs se fonde sur une approximation qui peut s'avérer erronée. Cette démarche consiste, en effet, à se placer dans le cadre théorique de l'innovation induite puis de considérer que les politiques de réduction des émissions ne peuvent altérer ni la direction ni la vitesse du progrès technique dans les secteurs non-énergétiques. En effet, il existe des effets d'éviction de l'investissement au profit des secteurs énergétiques, et un effet de ralentissement réduisant le volume de l'investissement disponible, qui conduisent à une modification importante du processus d'innovation, par les politiques climatiques, dans les secteurs non énergétiques. Au final, dans un cadre de modélisation élargi, l'habituel optimisme qui découle, dans la littérature, de l'endogénéisation du progrès technique pour le secteur énergétique doit être modéré puisque, en l'absence de politiques d'accompagnement spécifiques, nous obtenons des pertes de richesse plus importantes lorsque la direction et la vitesse du progrès technique sont endogènes que lorsqu'elles sont exogènes.

Il existe des limites fortes à notre modélisation qui peuvent conduire à surévaluer le phénomène de « mauvaise surprise » mais celles-ci ne remettent pas en question la réalité des mécanismes qui sont à l'œuvre :

- Les effets de « *spillover* », de diffusion du progrès technique peuvent limiter les effets d'éviction : dans cette version du modèle, la croissance de la productivité dans un secteur et dans un pays donné dépend strictement des investissements effectués dans ce secteur, en ce même pays et ignore les effets de propagation du progrès technique entre les régions et les secteurs.
- Les efforts de R&D et de formation du capital humain sont associés à des dynamiques sectorielles particulières et nous n'avons pas envisagé des politiques de R&D visant à réduire l'effet d'éviction et à relancer la productivité générale dans une phase critique où la politique climatique déclenche des mécanismes qui la ralentissent.
- Nous avons raisonné à valeur constante, entre le scénario de référence et les scénarios de stabilisation, pour le taux d'épargne et la part du profit des secteurs réinvestie. Or ces deux paramètres jouent un rôle critique dans la formation de l'investissement, et passer le cap de la transition vers des sociétés à très faible intensité carbone pourrait être facilité par une hausse du taux d'épargne global.

Malgré ces limites nous pensons pouvoir tirer de notre travail deux conclusions robustes :

a) Une taxe carbone ne peut pas « tout faire » : Lorsque l'on se place dans un cadre de représentation endogène du changement structurel, la valeur de la taxe carbone associée à un objectif de stabilisation à 450 ppmv présente tout d'abord un profil concave suivi, sur la

seconde moitié du siècle, d'une phase d'augmentation très rapide. Ce résultat est dans un premier temps lié à l'effet vertueux de l'apprentissage technologique qui permet la diminution du niveau de la taxe. Dans un deuxième temps, le secteur des transports joue un rôle clé puisque nous prenons en compte dans nos scénarios des mécanismes spécifiques comme les effets rebonds ou les effets d'inductions liés aux politiques d'infrastructures qui rendent ce secteur faiblement réactif au signal prix. Il se pose donc sur le long terme, en l'absence de politiques spécifiques, comme un obstacle fort à la décarbonisation qui provoque une augmentation significative du coût de la stabilisation.

b) Le coût associé à l'effort de décarbonisation est transitoire et les pertes de richesse sont plus importantes à court et moyen terme, à un moment où la valeur du carbone est faible. Et, contrairement à la vision de coûts croissants dans le temps qui apparaît dans une modélisation du progrès technique exogène, les pertes de richesse sont ici plus importantes à court et moyen terme, à un moment où la valeur du carbone est faible, qu'à très long terme où elle peut être importante. Ceci fait apparaître une contradiction, jusqu'à présent sous-estimée, entre la nécessité de mener une action d'abattement précoce et vigoureuse pour induire les changements techniques nécessaires à la réalisation de l'objectif de stabilisation, et d'autre part, la vulnérabilité des économies (en particulier pour les PED) à l'imposition d'une taxe carbone à un moment où leur fonctionnement repose encore fortement sur l'utilisation des combustibles fossiles.

En termes de **conclusions politiques**, notre travail plaide pour la nécessité d'envisager les politiques de réduction des émissions plus comme une **articulation de mesures** spécifiques avec un **tuilage temporel** assez fin que comme le déploiement d'un unique signal prix. Bien entendu, donner un prix au carbone est une condition *sine qua non* pour atteindre n'importe quel objectif de réduction des émissions, mais les résultats obtenus dans cette thèse poussent à penser qu'une seule taxe carbone ne peut pas « tout faire ». Sur le long terme, en effet, nous démontrons qu'une réorientation des **politiques d'infrastructures de transport** dans une direction cohérente avec l'objectif de décarbonisation permet de réduire fortement le coût de la stabilisation et d'obtenir même en fin de siècle un niveau de richesse supérieur à la trajectoire de référence. Avec ces politiques, il y a bien sûr, nous n'avons pu ici qu'effleurer le sujet, la nécessité de travailler sur le prix de l'immobilier comme un autre déterminant important des dynamiques de demande.
Nous soulignons aussi la nécessité d'accompagner l'effort de décarbonisation par une **augmentation des budgets de R&D** pour relancer l'innovation dans les secteurs non-énergétiques et éviter l'apparition d'un effet de grippage du moteur de croissance. Restent cependant dans nos scénarios des pertes de richesse transitoires dont la magnitude est importante et qui apparaissent à court et moyen terme dans les économies émergentes, à une période où le prix du carbone n'est pas très élevé. Sans qu'il ait été possible d'explorer le sujet dans le cadre de cette thèse, celle-ci a mis en évidence l'importance de mesures spécifiques permettant, à très court terme, à la fois de réorienter les investissements dans des infrastructures porteuses d'un sentier de croissance à plus faible intensité carbone et de compenser les chocs liés à l'apparition d'un prix du carbone significatif, en particulier pour les populations fragiles dans les pays en développement.

Au final, et pour conclure sur une note méthodologique définissant en même temps quelques orientations possibles pour un **futur agenda de recherche**, le cadre de modélisation que nous avons développé avec IMACLIM-R a démontré sa capacité à hybrider l'analyse économique en équilibre général avec des informations technologiques sectorielles. Ce réalisme pourrait toutefois être amélioré en alimentant les différents modules dynamiques sectoriels avec une description technologique plus fine mais aussi en représentant mieux les différents mécanismes visant à limiter la vitesse de déploiement de nouvelles technologies (goulets d'étranglement par exemple).

Ce travail montre aussi que l'ébauche de spatialisation de l'analyse que nous avons mené s'avère finalement au moins aussi importante que l'effort que nous avons produit pour améliorer le réalisme technologique de nos trajectoires. L'enjeu futur est d'introduire dans le cadre de la modélisation en équilibre général des éléments spatialisés hybridant les connaissances économiques avec des résultats provenant de la géographie ou de l'urbanisme. L'objectif principal de ce futur chantier de recherche nous semble résider dans la nécessité de clarifier et de représenter dans le cadre de l'équilibre général :

- Les liens entre les dynamiques spatiales, les prix de l'immobilier et les politiques d'infrastructures.
- La place de la valeur immobilière dans le système capitalistique moderne, en particulier utilisée comme une garantie pour l'endettement.

La prise en compte de cette dimension spatiale est, à notre sens, une voie d'amélioration centrale des modèles en vue d'éclairer la décision politique pour choisir un cadre de lutte contre le changement climatique qui soit le plus efficace possible.

Bibliographie

Abraham, S., 2004. “The Bush administration's approach to climate change”. *Science* 30 (5684), pp. 616-617.

Aghion, P., Howitt P., 1998, “Endogenous Growth Theory”. Cambridge, MA: MIT Press, 684 p.

Aglietta, M., Arezki, R., Breton, R., Fayolle, J., Juillard, M., Lacu, C., Cacheux, J. L., Rzepkowski, B., Touzé, V., 2001, “INGENUE, a multi-regional computable general equilibrium, overlapping-generations model”, *INGENUE Team*. Mimeo, CEPII, CEPREMAP, MINI-University of Paris X and OFCE. Internet: http://ideas.repec.org/p/sce/scecf0/178.html.

AIE, 2004, “World Energy Outlook”, *IEA/OECD*, Paris, France.

AIE, 2006, “Energy Technology Perspectives: Scenarios and Strategies to 2050”, *OECD/IEA* , Paris, France.

AIE, 2007, “World Energy Outlook”, *IEA/OECD*, Paris, France.

Ambrosi P., Hourcade J.C., Hallegatte S., Lecocq F., Dumas P., Ha Duong M., 2003, “Optimal Control Models and Elicitation of Attitudes Towards Climate Damages”, *Environmental Modeling and Assessment* 8(3): pp 133-147.

Anderson, D., Cavendish, W, 2001, “Dynamic simulation and environmental policy analysis: beyond comparative statics and the environmental Kuznets curve”, *Oxford Economic Papers*, vol. 53, pp. 721-746.

Armington, P. S. (1969). “A Theory of Demand for Products Distinguished by Place of Production”, IMF, *International Monetary Fund Staff Papers* 16: pp 170-201.

Arrow, K., J., Debreu, G., 1954, “Existence of equilibrium for a competitive economy”, *Econometrica* 22, pp. 265–290.

Arrow K., J. , 1962, “The Economic Implications of Learning-by-Doing”*, Review of Economics*, 29, pp. 155-173.

Arthur, B., 1989, “Competing Technologies, Increasing Returns, and Lock-In by Historical Small Events”. *Economic Journal* 99, pp 116-131.

Azar C., Dowlatabadi H. 1999. “A Review of Technical Change in Assessments of Climate Policy”, *Annual Review of Energy and the Environment* 24: pp 513–44.

Babiker, M.H., Reilly, J.M., Mayer, M., Eckaus, R.S., Wing, I.S., Hyman, R.C., 2001, “The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model: Revisions, Sensitivities, and Comparisons of Results”, Report No. 71, *Joint Program on the Science and Policy of Global Change*, MIT, Cambridge, MA.

Bardi, U., 2005, “The mineral economy: a model for the shape of oil production curves”, *Energy Policy* 33, pp. 53-61.

Barker, T., I. Bashmakov, A. Alharthi, M. Amann, L. Cifuentes, J. Drexhage, M. Duan, O. Edenhofer, B. Flannery, M. Grubb, M. Hoogwijk, F. I. Ibitoye, C. J. Jepma, W.A. Pizer, K. Yamaji,

2007, “Mitigation from a cross-sectoral perspective”. *In Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Barker, T.S., Ekins, P., Foxon, T., 2007, “The macro-economic rebound effect and the UK economy”, *Energy Policy*, 35, pp.4935-4946.

Barreto L., Kypreos S., 1999, “Technological Learning in Energy Models: Experience and Scenario Analysis with MARKAL and the ERIS Model Prototype”, *PSI Bericht 99-08*. Paul Scherrer Institute, Villingen, Switzerland.

Barro R. J., Sala-i-Martin X., 1991, “Convergence Across States and Regions”, *Brookings Papers of Economic Activity*, 1991:1.

Barro R. J., Sala-i-Martin X., 1992, “Convergence”, *Journal of Political Economy*, v. 100, #21, p.223-251.

Barro R. J., Sala-i-Martin X., 1998, *Economic Growth*, MIT Press.

Bauquis, R., 2004, « Quelles énergies pour les transports au XXI^{eme} siècle ? », *Revue de l’énergie*, 561, pp. 569-585.

Bentley, R.W., 2002, “Global oil & gas depletion: an overview”, *Energy Policy* 30 3, pp. 189-205.

Bernard A. L., Vielle M., 1998, « GEMINI-E3 un modèle d’équilibre général national-international économique, énergétique et environnemental », *Économie et Prévision*, n°36, pp. 1-48.

Berndt E., Wood D., 1975, “Technology, Prices and the Derived Demand for Energy”, *The Review of Economics and Statistics*, August, pp 259-268.

Blanchflower D. G., Oswald A. J. ,1995, “An Introduction to the Wage Curve”, *Journal of Economic Perspectives,* 9(3), pp 153-167.

Böhringer, C., Löschel, A., 2002, “Economic Impacts of Carbon Abatement Strategies”, in: Böhringer C., Finus M., Vogt C. (Eds.), *Controlling Global Warming-Perspectives from Economics, Game Theory and Public Choice* (New Horizons in Environmental Economics). Edward Elgar, Cheltenham, pp. 98-172.

Bosetti V., Carraro C, Galeotti M., 2006, “The Dynamics of Carbon and Energy Intensity in a Model of Endogenous Technical Change”, in Grubb, M., Carraro, C., Schellnuber, J., eds., “Endogenous Technological Change and the Economics of Atmospheric Stabilisation”, *The Energy Journal*, Special Issue: pp 191-205

Boston Consulting Group, 1968, *Perspectives on Experience*. Boston Consulting Group Inc.

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

Burniaux J.M., Martin J.P, Nicoletti G, Oliveira, GREEN J. , 1992, “A Multi-Region Dynamic General Equilibrium Model for Quantifying the Costs of Curbing CO2 Emissions: A Technical Manual”, *Working Paper 116, Economics and Statistics Department*, OECD, Paris.

Cass, D, 1965, “Optimum growth in an aggregative model of capital accumulation,” *Review of Economic Studies*, 32, pp. 233–240.

Castles I., Henderson D., 2003, “The IPCC Emission Scenarios: An Economic-Statistical Critique”, *Energy & Environment*, vol. 14 (2-3), pp. 159-185.

Chung, J., 1994, “Utility and Production Functions” , Blackwell, Oxford.

Clarke, J., F., Edmonds, J. A. (1993) Modelling energy technologies in a competitive market *Energy Economics*, Volume 15, Issue 2, Pages 123-129

Clarke, L., Weyant, J., Birky, A., 2006, “On the sources of technological change: assessing the evidence”, Energy Economics (28), pp. 579-595.

Clarke, L., Weyant, J., Edmonds, J., 2008, “On the sources of technological change: What do the models assume”, *Energy Economics*, Volume 30, Issue 2, March 2008, pp. 409-424.

Cohen, A.J., and G.C. Harcourt, 2003, “Whatever Happened to the Cambridge Capital Theory Controversies?”, *Journal of Economic Perspectives,* 17(1): pp. 199-214.

Commoner, B., 1971, *The Closing Circle*, Knopf, New York.

Corrado C., Mattey, J., 1997, “Capacity Utilization”, *Journal of Economic Perspectives*, Vol. 11, No. 1, pp. 151-167.

Crassous, R., Hourcade, J.-C., Sassi, O., 2006, “Endogenous Structural Change and Climate Targets. Modeling experiments with Imaclim-R.” In “Endogenous Technological Change and the Economics of Atmospheric Stabilisation.” *The Energy Journal*, Special Issue: 259-276.

Crassous, R., Sassi, O., Waisman, H., Hourcade J.-C., Criqui, P., Mima, S., Kitous, A., 2007, “Prospects for Energy-Intensive Industries under a 450 ppm CO2 constraint: lessons from an IMACLIM-POLES dialog”, *International Energy Workshop*, Stanford.

Domar, E. D., 1946, “Capital Expansion, Rate of Growth, and Employment”, *Econometrica*, 14, pp. 137-147.

Dowlatabadi H., Oravetz, M., 2006, "Understanding Trends in Energy Intensity: a simple model of technical change." *Energy Policy*, 34(17).

Dutton J., Thomas A., 1984. “Treating progress functions as a managerial opportunity”. *The Academy of Management Review* 9 (2), pp 235–247.

Edenhofer E., Lessmann K., Bauer N., 2006, “Mitigation strategies and costs of climate protection : The effects of ETC in the hybrid model MIND”, in Grubb, M., Carraro, C., Schellnuber, J., eds. Endogenous Technological Change and the Economics of Atmospheric Stabilisation. *The Energy Journal*, Special Issue: pp. 207-222

Fishbone L.G., Giesen G.A., Goldstein H.A., Hymen H.A., 1983, “User’s Guide for MARKAL (BNL/KFA Version 2.0).” *BNL-46319*, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York.

Fisher, B.S., N. Nakicenovic, K. Alfsen, J. Corfee Morlot, F. de la Chesnaye, J.-Ch. Hourcade, K. Jiang, M. Kainuma, E. La Rovere, A. Matysek, A. Rana, K. Riahi, R. Richels, S. Rose, D. van

Vuuren, R. Warren, 2007, "Issues related to mitigation in the long term context", *In Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Inter-governmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

Frankel, M., 1962, "The production function in allocation and growth: a synthesis", *American Economic Review* 52, pp. 995-1022.

Frondel M., Schmidt M. C., 2002, "The Capital-Energy Controversy: An Artifact of Cost Shares?", *The Energy Journal* Vol.23, Issue 3, pp 53-79.

Fulton L. and Eads G., IEA/SMP Model Documentation and Reference Case Projection, July 2004 http://www.wbcsd.org/web/publications/mobility/smp-model-document.pdf

Gerlagh R., 2006, "ITC in a global growth-climate model with CCS. The value of induced technical change for climate stabilization", *The Energy Journal* (Special issue on *Endogenous Technological Change and the Economics of Atmospheric Stabilisation*), pp 55–72.

Ghersi F., Hourcade J.-C., 2006, Macroeconomic consistency issues in E3 modeling: the continued fable of the elephant and the rabbit, *The Energy Journal*, 27 (Special Issue n°2: *Hybrid Modeling of Energy-Environment Policies: Reconciling Bottom-up and Top-down*), pp 27-49.

GIEC, 1996, "Climate change 1995. Economic and Social Dimensions of Climate Change", Contribution of Working Group III to the *Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.

GIEC, 2007, "Further work on scenarios, Report from the IPCC Expert meeting towards new scenarios", http://www.ipcc.ch/meetings/session28/doc8.pdf

Gillingham , K., T., Newell , R., G. , Pizer , W., A., 2007. "Modeling Endogenous Technological Change for Climate Policy Analysis", Discussion Papers *Resources For the Future*.

Goolsbee A., 1998, "Does Government R&D Policy mainly Benefit Scientists and Engineers?", *American Economic Review* 88 (2), 298–302.

Goulder L., Schneider S., 1999, "Induced Technological Change and the Attractiveness of CO_2 Abatement Policies", *Energy Economics*, 21, pp,211-253.

Greening, L., Greene, D.L., Difiglio, C., 2000, "Energy efficiency and consumption the rebound effect—a survey". *Energy Policy*, 28, pp. 389-401.

Griliches Z., 1992, "The Search for R&D Spillovers", *Scandinavian Journal of Economics,* 94, pp 29–47. Supplement.

Grubb, M., Chapuis, T., Ha Duong, M., 1995, "The economics of changing course, implications of adaptability and inertia for optimal climate policy", *Energy Policy* 23 4/5, pp. 417-431.

Grubb, M., 1997, "Technologies, energy systems and the timing of CO2 emissions abatement: An overview of economic issues", *Energy Policy*, Volume 25, Issue 2, pp. 159-172.

Grubb M., Köhler J., Anderson D., 2002, "Induced technical change in energy and environmental modeling: analytic approaches and policy implications", *Annual Review of Energy and the Environment,* 27, pp 271–308.

Grubb, M., Carraro, C., Schellnhuber, J., 2006, "Technological Change for Atmospheric Stabilization", *The energy journal*, volume 27, pp. 1-16

Grübler A., Nakićenović N., Nordhaus W. D. (Eds.), 2002, *Technological Change and the Environment,* Washington, DC, Resources for the Future.

Ha-Duong M., Grubb M., Hourcade J.-C., 1997, "Influence of Socio-Economic Inertia and Uncertainty on Optimal CO_2 Emission Abatement", *Nature,* 390, pp 270-73.

Hallegatte, S., Hourcade, J.-C., Dumas, P., 2007, "Why economic dynamics matter in assessing climate change damages: Illustration on extreme events", *Ecological Economics* 62 (2), pp. 330-340.

Halsnæs, K., P. Shukla, D. Ahuja, G. Akumu, R. Beale, J. Edmonds, C. Gollier, A. Grübler, M. Ha Duong, A. Markandya, M. McFarland, E. Nikitina, T. Sugiyama, A. Villavicencio, J. Zou, 2007, "Framing issues", In *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

Hanson, D., 1999, "A Framework for Economic Impact Analysis and Industry Growth Assessment: Description of the AMIGA System", *Policy and Economic Analysis Group*, Decision and Information Sciences Division, Argonne National Laboratory, Argonne, IL.

Harrod, R. F., 1939, "An Essay on Dynamic Theory", *Economic Journal,* 49, pp. 14-33.

Hicks, J.R., 1932, "The Theory of Wages". *Macmillan*, London.

Hildenbrand W., 1994, *Market Demand: theory and empirical evidence*, Princeton University Press.

Hotelling, H., 1931, "The economics of exhaustible resources", *The Journal of Energy and Development* 39 (2), 137-175.

Hourcade J.C.,1993, "Modelling long-run scenarios. Methodology lessons from a prospective study on a low CO2 intensive country", *Energy Policy* 21(3): pp 309-326.

Hourcade, J.C., P.R. Shukla, 2001, "Global, regional, and national costs and ancillary benefits of mitigation", in: B. Metz, O. Davidson, R. Swart, J. Pan (Eds.), *Climate Change 2001: Mitigation*, Cambridge University Press, Cambridge, MA, 2001.

Hourcade J.C., Journé V., 2002, « Monsieur Homais, les guides de montagne et le maître nageur : variations sur la négation des risques climatiques », *Critique Internationale*, 26, pp. 65-79.

Hourcade J.C., Jaccard M., Bataille C., Ghersi, F.,2006, "Introduction to the Special Issue of the energy journal*"*, *The Energy Journal* special issue : *Hybrid modelling of energy environment policies : reconciling bottom-up and top-down*.

Hubbert, M.K., 1956, “Nuclear energy and the fossil fuels”, *Drilling and Production Practice. American Petroleum Institute*, pp. 7-25.

Hubbert, M.K., 1962, “Energy Resources”, *A Report to the Committee on Natural Resources. National Academy of Science*, Government Printing Office, Publication No. 1000-D.

INGENUE, 2006, “World Growth and International Capital Flows in the XXIrst Century”, *Document de travail OFCE*, n° 2006-07, avril.

IPCC, 2007, *Climate Change 2007: synthesis report,* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Jaccard, M., Bailie, A., Nyboer, J., 1996, “CO2 emission reduction costs in the residential sector: Behavioral parameters in a bottom-up simulation model”, *The Energy Journal* 17 4, pp. 107-134.

Jaccard, M., Failing, L., Berry, T., 1997. “From equipment to infrastructure: community energy management and greenhouse gas emission reduction”. *Energy Policy* 25 (11), pp.1065–1074.

Jaccard M., 2005, “Hybrid Energy-Economy Models and Endogenous Technological Change”, in eds. Loulou R., Waaub JP., Zaccour G., *Energy and Environment,* Springer, pp 81-110.

Jakeman G., Hanslow K., Hinchy M., Fisher B.S., Woffenden K.,2004, “Induced innovations and climate change policy”, *Energy Economics*, vol. 26, n°6, pp.937-960.

Johansen L., 1959, “Substitution versus Fixed Production Coefficients in the Theory of Growth: A synthesis”, *Econometrica,* 27, pp 157-176.

Jorgenson D.W. , Fraumeini B., 1981, “Relative Prices and Technical Change”*,* in Berndt E.R., Field B.C. (eds.), *Modelling and Measuring Natural Resource Substitution*, MIT Press, Cambridge MA, United States.

Kahn Ribeiro, S., S. Kobayashi, M. Beuthe, J. Gasca, D. Greene, D. S. Lee, Y. Muromachi, P. J. Newton, S. Plotkin, D. Sperling, R. Wit, P. J. Zhou, 2007, “Transport and its infrastructure”. In *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Kenworthy, J.R., Laube, F.B., 1999, “Patterns of automobile dependence in cities: an international overview of key physical and economic dimensions with some implications for urban policy”, *Transportation Research Part A* 33, pp. 691-723.

Kim S.H.., Edmonds, J., Lurz, J., Smith, S.J., Wise, M., 2006, “The Object-oriented Energy Climate Technology Systems (ObjECTS) Framework and Hybrid Modeling of Transportation in the MiniCAM Long-Term, Global Integrated Assessment Model.” *The Energy Journal*, 27 (Special Issue n°2: *Hybrid Modeling of Energ-Environment Policies: Reconciling Bottom-up and Top-down*).

Köhler J., Grubb M., Popp D., Edenhofer O. ,2006, “The Transition to Endogenous Technical Change in Climate-Economy Models”. in Grubb, M., Carraro, C., Schellnuber, J., eds. Endogenous

Technological Change and the Economics of Atmospheric Stabilisation. *The Energy Journal*, Special Issue.

Koopmans, T., C., 1965, "On the concept of optimal economic growth," *in (Study Week on the) Econometric Approach to Development Planning*, chap. 4, pp. 225–87, North-Holland Publishing Co., Amsterdam.

Kouvaritakis N., Soria A., Isoard S. ,2000, "Endogenous Learning in World Post-Kyoto Scenarios: Application of the POLES Model under Adaptive Expectations" , *International Journal of Global Energy Issues*, Vol. 14, No. 1-4, pp 222-248.

Labriet, M., Loulou, R., Kanudia, A., Vaillancourt, K., 2004, "The advanced world markal Model: Description of the inputs", *Les Cahiers du GERAD*.

Laherrère, J.H., 2001, "Forecasting future production from past discovery". http://www.hubbertpeak.com/laherrere/opec2001.pdf

Laherrère, J.H., 2003, "Future of oil supplies", http://www.oilcrisis.com/laherrere/zurich.pdf.

Lecocq F., Hourcade J.C., Ha-Duong M.,1998, "Decision making under uncertainty and inertia constraints : sectoral implications of the when flexibility", *Energy Economics* 20(5/6), pp 539-555.

Leggett, J., W.J. Peppe, R.J. Swart, J.A. Edmonds, L.G. Meira Filho, I. Mintzer, M-X. Wang et J. Wasson, 1992 : Emissions Scenarios for IPCC: An Update. In *Climate Change 1992. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*, Houghton, J.T., B.A. Callander et S.K. Varney (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, pp. 69-96.

LEPII-EPE, 2006, "The POLES model", *Institut d'Économie et de Politique de l'Énergie*, Grenoble, France, 12 pp. http://webu2.upmf-grenoble.fr/iepe/textes/POLES12p_Jan06.pdf (accédé le 12/04/2008)

Litman, T., 2001, "Generated Traffic; Implications for Transport Planning," *ITE Journal*, Vol. 71, No. 4, April, 2001, pp. 38-47. www.vtpi.org/gentraf.pdf, accédé le 21/04/2008,.

Lomborg B., 2001, *The Skeptical Environmentalist*, Cambridge University Press, 515 p.

Loschel A., 2002, "Technological Change in Economic Models of Environmental Policy: a Survey", *Ecological Economics*, 43, pp105–126.

Lucas, R., 1988. "On the Mechanics of Economic Development". *Journal of Monetary Economics* 100: 223–251.

Maddison, A., 1995, *Monitoring the World Economy: 1820 – 1992*, OECD Development Center, 260 p.

Manne, A., Wene C.-O.,1992, "MARKAL-MACRO: A Linked Model for Energy-Economy Analysis", *Bnl-47161 report*, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York.

McDonald, A., Schrattenholzer, L., 2001, "Learning Rates for Energy Technologies". *Energy Policy* 29(4), pp 255-261.

McFarland J. R., Reilly J. M., Herzog H. J., 2004, "Representing Energy Technologies in Top-Down Economic Models using Bottom-Up Information", *Energy Economics*, Vol 26, Issue 4, July, pp 685-707.

McKibbin, W. , Ross, M., Shackleton, R., Wilcoxen, P., 1999, "Emissions Trading, Capital Flows and the Kyoto Protocol", *The Energy Journal Special Issue*, "The Costs of the Kyoto Protocol: A Multi-model Evaluation", pp287-334.

McKibbin, W., Pearce, D., Stegman, A., 2004, "Long Run Projections for Climate Change Scenarios", *Working Papers in International Economics*, Lowy Institute for International Policy, May 2004, No. 1.04, 71 pp. http://www.oecd.org/dataoecd/7/32/35912503.pdf

Messner S., 1997, "Endogenised Technological Learning in an Energy System Model", *Journal of Evolutionary Economics*, 7, pp 291-313.

Messner, S., Schrattenholzer, L., 2000, "MESSAGE–MACRO: linking an energy supply model with a macroeconomic module and solving it iteratively", *Energy* 25, pp. 267-282.

Morita T., Lee, H-S, 1997, *Emission scenario database prepared for IPCC Special Report on Emission Scenarios.* Disponible sur http://sres.ciesin.org/index.html.

Muellbauer J., 1976, "Community Preferences and the Representative Consumer", *Econometrica*, 44(5), pp 979-999.

Nakicenovic N., Alcamo J., Davis G., de Vries B., Fenhann J., Gaffin S., Gregory K., Grübler A., Jung T.Y., Kram T., La Rovere E.L., Michaelis L., Mori, S. Morita, T. Pepper, W. Pitcher, H. Price L., Riahi K., Roehrl A., Rogner H.-H., Sankovski A., Schlesinger M., Shukla P.R., Smith S., Swart R., van Rooijen S., Victor N., Dadi Z., 2000, IPCC *Special Report on Emissions Scenarios*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 599p.

Nakicenovic, N., Grübler, A., Gaffin, S., Jung, T.-T., Kram, T., Morita, T., Pitcher, H., Riahi, K., Schlesinger, M., Shukla, P.R., van Vuuren, D., Davis, G., Michaelis, L., Swart, R., Victor, N., 2003, "IPCC SRES revisited: a response", *Energy & Environnment* 14 (2–3), pp. 187–214.

Nakicenovic, N., Kolp, P., Riahi, K., Kainuma, M., Hanaoka, T., 2006, "Assessment of emissions scenarios revisited", *Environmental Economics and Policy Studies* **7** (3), pp. 137–173.

Nordhaus, W.D., 1973. "The allocation of energy resources.", *Brookings Papers on Economic Activity 3*, pp. 529–570.

Nordhaus William, 1994, "Managing the Global Commons: The Economics of Climate Change", Cambridge, MA: MIT Press.

Nordhaus W., 1999, "Modeling induced innovation in climate change policy", Paper for workshop *Induced Technological Change and the Environment* June 21_22, 1999, IIASA, Laxenburg.

Nordhaus, W., 2002. "Modeling Induced Innovation in Climate Change Policy". In *Technological Change and the Environment*, edited by A. Grubler, N. Nakicenovic and W. Nordhaus. Washington, DC: Resources for the Future Press. pp. 182-209

Oliveira Martins, J., Gonand F., Antolin P., de la Maisonneuve C., and Kwang-Y, 2005, "The impact of ageing on demand, factor markets and growth", *OECD Economics Department Working Papers*, #420, OECD Economics Department.

Paltsev, S., Reilly J., Jacoby H., Eckaux R., McFarland J., Sarofim M., Asasoorian M., Babiker M., 2005, "The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model: Version 4", Report no. 125. *Joint Program on the Science and Policy of Global Change*, MIT, Cambridge, MA.

Popp D., 2002, "Induced innovation and energy prices", *American Economic Review* 92 (1), pp 160–180.

Popp D., 2004a, "ENTICE: endogenous technological change in the DICE model of global warming", *Journal of Environmental Economics and Management* 48, pp 742–768.

Popp,D., 2004b., "R&D Subsidies and Climate Policy: Is there a "Free Lunch"", *NBER Working Paper* 10880.

Popp D., 2006, "Comparison of Climate Policies in the ENTICE-BR Model", in Grubb, M., Carraro, C., Schellnuber, J., eds. Endogenous Technological Change and the Economics of Atmospheric Stabilisation. *The Energy Journal*, Special Issue: pp. 163-174.

Quah, D., 1996, "Empirics for economic growth and convergence", *European Economic Review*, vol. 40, no. 6, pp. 1353-1375.

Ramsey, F., 1928, "A Mathematical Theory of Saving", *Economic journal* 38, p. 543-559.

Raupach, M., Marland, G., Ciais, P., Le Quéré, C., Canadell, J., Klepper, G., Field, C., 2007, "Global and regional drivers of accelerating CO_2 emissions", *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 104 (24), pp. 10288–10293.

Rao S., Keppo I., Riahi K., 2006, "Importance of technological change and spillovers in long term climate policy", in Grubb, M., Carraro, C., Schellnuber, J., eds. Endogenous Technological Change and the Economics of Atmospheric Stabilisation. *The Energy Journal*, Special Issue: pp. 55–72.

Rehrl T., Friedrich R., 2006, Modelling long-term oil price and extraction with a Hubbert approach: The LOPEX model, *Energy Policy*, 34(15) , pp. 2413-2428.

Roehrl, R.A., Riahi, K., 2000. "Technology dynamics amd greenhouse gas emissions mitigation—a cost assessment.", *Technological Forecasting and Social Change* 63 3, pp. 231–261.

Rogner, H., 1997, "An assessment of world hydrocarbon resources", *Annual Review of Energy and the Environment,* 22, pp. 217-262.

Romer, P., M., 1986, "Increasing Returns and Long Run Growth", *Journal of Political Economy* 94(5), pp. 1002-1037.

Romer, Paul. 1990, "Endogenous Technological Change", *Journal of Political Economy* 98,5, pp S71–S102.

Ruttan, V., W., 2002, "Sources of Technical Change: Induced Innovation, Evolutionary Theory, and Path Dependence", in *Technological Change and the Environment*, Grubler A., Nakicenovic N., Nordhaus W. D. (eds.), Washington, DC: Resources for the Future, pp. 320-363

Sachs, J. D., Warner, A., M., 2001, "The Curse of Natural Resources," *European Economic Review*, Vol. 45, No. 4–6, pp. 827–38.

Samuelson P. A., 1962, "Parable and Realism in Capital Theory: The Surrogate Production Function", *Review of Economic Studies*, 29, No. 3.

Sands, R., D., Miller, S., Kim, M.-K., 2005, "The Second Generation Model: Comparison of SGM and GTAP Approaches to Data Development", *Pacific Northwest National Laboratory*, PNNL-15467, 2005.

Sano F., Akimoto K., Homma T., Tomoda T. ,2006, "Analysis of Technological Portfolios for CO2 Stabilizations and Effects of Technological Changes", in Grubb, M., Carraro, C., Schellnuber, J., eds. Endogenous Technological Change and the Economics of Atmospheric Stabilisation. *The Energy Journal*, Special Issue.

Sassi O., Crassous R., Hourcade J.-C., 2005, "Induced technical change in the transportation sector and induced mobility", *International Energy Workshop*, Kyoto.

Sassi, O., Crassous, R., Hourcade, J.-C., Gitz, V., Waisman, H., Guivarch, C., 2007, "Imaclim-R: a modelling framework to simulate sustainable development pathways", *International Journal of Global Environmental Issues* , Special Issue, In press.

Sassi, O., Guivarch, C., Crassous, R., Hourcade J.-C., Waisman, H., 2007, "Long-run Emissions Scenarios Revisited: Some Dynamics Underlying Plausible very Carbon-intensive Pathways", *International Energy Workshop*, Stanford.

Schäfer A., Victor D.G., 2000, "The future mobility of future population", *Transportation Research Part A*, 34, pp 171-205.

Schumpeter J., 1942, "Capitalism, Socialism and Democracy", Harper, New York.

Shukla P.R., Ghosh, D., Garg, A., 2003, "Future Energy Trends and GHG Emissions for India", in Toman M.A, Charvaraty U., Gupta S. (eds.) *Global Climate Change: Perspectives on Economics and Policy from a Developing Country*, Resources for the Future, Washington DC, U.S.A. pp 11-35.

Sims, R.E.H. , R.N. Schock, A. Adegbululgbe, J. Fenhann, I. Konstantinaviciute, W. Moomaw, H.B. Nimir, B. Schlamadinger, J. Torres-Martínez, C. Turner, Y. Uchiyama, S.J.V. Vuori, N. Wamukonya, X. Zhang, 2007, "Energy supply", *In Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Solow, R., M., 1956, "A Contribution to the theory of economic growth", *Quarterly Journal of Economics* 70(1), p.65-94.

Solow, R., M., 1957, "Technical change and the aggregate production function", In *Business Cycle Theory*, ed. FE Kydland, pp. 38-46.

Solow, R., M., 1959, "Investment and Technological Progress", in: Arrow, K., Karlin, S., Suppes, P. (Eds.), *Mathematical Methods in the Social Sciences*, Stanford University Press, Stanford, CA, pp. 89-104.

Solow, R., M., 1988, “Growth theory and after”, *The American Economic Review,* 78:3, pp 307-317.

Stern, N., 2006, “The Stern review: the economics of climate change”, Cambridge University Press, Cambridge.

Stiglitz, J.E., 1990, “Comments: Some Retrospective Views on Growth Theory”, in P. Diamond, ed., *Growth/Productivity/Unemployment: Essays to Celebrate Robert Solow’s Birthday*, pp. 50-68, Cambridge, MA: MIT Press.

Storchmann, K., 2005, “Long-run gasoline demand for passenger cars: the role of income distribution”, *Energy Economics* **27**, pp. 25-58.

Szklo, A., Machado, G., Schaeffer, R., 2007, “Future oil production in Brazil—estimates based on a Hubbert model”, *Energy Policy* 35, pp. 2360-2367.

United Nations, 1998, “World Population Prospects: The 1998 Revision.”

Van Meijl H., van Tongeren F., 1999, “Endogenous Technology Spillovers and Biased Technical Change in the GTAP Model”., *GTAP Technical Paper 15*.

Vuuren D., O'Neill B., 2006, “The Consistency of IPCC's SRES Scenarios to 1990–2000 Trends and Recent Projections”, *Climatic Change*, Vol. 75, 1-2, pp. 9-46.

Waisman, H., Hourcade J.-C., Sassi, O., Crassous, R., Guivarch, C., 2007, “Investigating the Interplay between Climate Change Policies and the Strategic Behavior of Middle-East Oil Producers”, *International Energy Workshop*, Stanford.

Wene C.-O., 2000, “Experience Curves for Energy Technology Policy”, OECD/IEA, Paris.

Weyant J.P., Olavson, T. ,1999, “Issues in Modelling Induced Technological Change in energy, Environmental, and Climate Policy”, *Environmental Modelling and Assessment*, 4, pp 67-85.

Weyant, J.P. (ed.), 2004, “EMF 19 alternative technology strategies for climate change policy”. *Energy Economics*, **26**(4), pp. 501-755.

Wigley T. M. L., Richels R., Edmonds J. A., 1996, “Economic and Environmental Choices in Stabilization of Atmospheric CO2 Concentrations”, *Nature* 369(18 January): pp 240-243

Wing S., I., 2006, “Representing induced technological change in models for climate policy analysis”, *Energy Economics*, Volume 28, Issues 5-6, Pages 539-562

Winters, L., A., Yusuf, S., 2007, *Dancing with Giants: China, India, and the Global Economy*, World Bank, Washington DC.

Wright T.P.,1936, “Factors Affecting the Costs of Airplanes”, *Journal of the Aeronautical Sciences*, 3 February, pp. 122-128.

Zahavi Y., Talvitie A., 1980, “Regularities in Travel Time and Money Expenditures”, *Transportation Research Record* 750, pp13-19.