HAL open science

Modelling long-run scenarios in a second-best world : application to climate policies

Renaud Crassous

To cite this version:

Renaud Crassous. Modelling long-run scenarios in a second-best world : application to climate policies. Humanities and Social Sciences. AgroParisTech, 2008. English. NNT : 2008AGPT0073 . pastel-00004809

HAL Id: pastel-00004809

https://pastel.hal.science/pastel-00004809

Submitted on 7 Apr 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N°/__/__/__/__/__/__/__/__/__/__/

THÈSE

pour obtenir le grade de

Docteur

de

l'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (Agro Paris Tech)

Spécialité : Sciences Économiques

présentée et soutenue publiquement
par

Renaud CRASSOUS

le 21 Novembre 2008

MODELISER LE LONG TERME DANS UN MONDE DE SECOND RANG : APPLICATION AUX POLITIQUES CLIMATIQUES

Directeur de thèse : ***Jean-Charles HOURCADE***

CIRED, Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement, UMR CNRS n°8568, 94130 Nogent sur Marne

Devant le jury :

M. Claude MILLIER	**Président**
M. Pierre-Noël GIRAUD, Professeur à l'Ecole des Mines de Paris	**Rapporteur**
M. Emilio Lebre de la ROVERE, Professeur à l'Université de Rio de Janeiro	**Rapporteur**
M. Dominique BUREAU, Professeur à l'Ecole Polytechnique	
M. Jean-Charles HOURCADE, Directeur du CIRED	

L'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (Agro Paris Tech) est un Grand Etablissement dépendant du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, composé de l'INA PG, de l'ENGREF et de l'ENSIA (décret n° 2006-1592 du 13 décembre 2006)

à Théodore

Remerciements

J'adresse mes sincères remerciements aux membres du jury extérieurs au CIRED : à Claude Millier qui accepté d'en être le président après avoir suivi mon projet de recherche depuis sa genèse, à Pierre-Noël Giraud et Emilio Lèbre La Rovere qui ont accepté d'en être rapporteurs, et à Dominique Bureau qui s'est joint à eux pour évaluer le travail accompli.

Comme le veut la formule consacrée, j'endosse l'unique responsabilité du contenu de cette thèse, des critiques, des affirmations et des propositions qu'elle contient, du choix des couleurs des figures et des erreurs qui ont résisté à la relecture. Mais ce serait une petite imposture de m'en approprier la parenté exclusive, car j'ai progressé sous influences et grâce à des soutiens déterminants, auxquels je souhaite ici exprimer ma reconnaissance.

Celle-ci va en premier lieu à Jean-Charles Hourcade, mon directeur de thèse, dont le souci de la transmission des idées et le bouillonnement intellectuel n'ont d'égal que son optimisme énergique. Sous son impulsion, le CIRED est un lieu exceptionnel de liberté intellectuelle et de foisonnement des idées au service des enjeux collectifs.

C'est peu dire que je dois énormément à Olivier Sassi, collègue et ami, précieux partenaire quasi-quotidien durant quatre années de thèses parallèles. Grâce à lui tout était simplement plus facile, bien au-delà des rendements croissants dans le développement du modèle.

Je remercie aussi le reste de notre petite équipe de modélisation, Céline Guivarch, Henri Waisman, Meriem Hamdi-Cherif, pour leur collaboration précieuse et sympathique, ainsi que pour leurs contributions effectives au modèle utilisé dans cette thèse. Je tire mon chapeau à Vincent Gitz et Philippe Ambrosi, anciens thésards puis chercheurs au CIRED, qui ont dépensé plusieurs mois de leur temps de thèse sur la première maquette du modèle sans jamais en récolter les fruits. Un juste retour des choses serait qu'ils puissent un jour profiter des larges possibilités du modèle Imaclim-R, bâti sur leur travail préliminaire. Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué à rendre ces années de travail au CIRED riches, sympathiques et motivantes : Philippe Quirion, Sandrine Mathy, Stéphane Hallegatte, Patrice Dumas, André Pereira, Amaro Pereira, Frédéric Ghersi, Catherine Boemare, Dominique Finon, Tarik Tazdait, Yaël Serfaty, Eleonore Tyma, Naceur Chaabane, Danny Tran, Christophe Cassen et tous les autres !

Cette thèse n'aurait pu voir le jour sans l'accueil de l'équipe de l'ENGREF. Je remercie Jacques Bréger, directeur des études, Cyrille Van Effenterre et Laurent Rosso, directeurs successifs de l'ENGREF, et Jean-Pierre Camuzard, ancien chef du département Environnement, qui m'ont accordé une liberté précieuse dans la gestion de mon emploi du temps entre CIRED et ENGREF. Je remercie aussi tous mes collègues de l'ENGREF pour l'ambiance de travail simple et agréable qu'ils contribuent à entretenir dans cette institution.

Je souhaite remercier aussi ces personnes croisées sur mon itinéraire et qui ont largement enrichi ces années de thèse. Merci à Marc Gillet, Jean Jouzel et Michel Petit, membres permanents de la délégation française auprès du GIEC, pour leur invitation à me joindre à eux pour l'examen du 4ème rapport d'évaluation à Bangkok puis Valencia. Merci aux membres du comité de pilotage de l'étude « Scénarios sous Contrainte Carbone » de la FONDDRI, pour leur soutien dans nos travaux de modélisation, leur confiance et leur questionnement stimulant. Merci à Patrick Criqui et son équipe, pour la collaboration fructueuse et agréable que nous avons entamée à l'occasion de cette étude. Merci aux professeurs Emilio de la Rovere et Shukla pour leur enthousiasme toujours encourageant sur le développement d'Imaclim-R.

Je remercie bien sûr ma famille, ma belle-famille et mes amis de leurs encouragements. Mention spéciale à mon ami Alain Feuvrier pour son soutien au long cours et sa relecture attentive.

Et pour finir en beauté, je remercie Cécile, ma merveilleuse épouse, pour sa patience et son accompagnement de tous les jours, si précieux.

Table des matières

REMERCIEMENTS **5**

TABLE DES MATIERES **7**

LISTE DES FIGURES **11**

LISTE DES TABLEAUX **13**

INTRODUCTION GENERALE **15**

REFERENCES 22

CHAPITRE 1 LA MODELISATION DE LONG TERME : ETAT DE L'ART ET TAXINOMIE DES OUTILS DISPONIBLES **25**

1 DANS LA JUNGLE DES SCENARIOS 28
1.1 Un panel de trajectoires difficile à exploiter *29*
1.2 Les SRES : retour sur un essai à perfectionner *33*
2 DES SCENARIOS AUX MODELES 39
2.1 Un regard historique sur le développement de la « boîte à outils » *39*
2.1.1 A la recherche d'une alternative aux approches prévisionnistes en échec 40
2.1.2 La question des coûts : un déclencheur de la mobilisation de l'équilibre général 44
2.1.3 Une mise en opposition Bottom-up / Top-Down entretenue mais de moins en moins éclairante 45
2.1.4 Le développement récent des modèles hybrides 47
2.2 Typologie : le jeu répétitif de 5 familles *48*
3 CONCLUSION 53
RÉFÉRENCES 55

CHAPITRE 2 MODELES EN CONCURRENCE : REPRESENTATIONS ALTERNATIVES DU MONDE REEL OU INSUFFISANCES THEORIQUES ? **59**

1 LA REPRESENTATION DE LA CROISSANCE ECONOMIQUE GLOBALE 63
1.1 Analyse des modèles existants *63*
1.2 L'idée du rattrapage au cœur de la croissance à long terme *66*
1.3 Déséquilibres temporaires ou chroniques : la grande lacune des modèles ? *73*
2 LA REPRESENTATION DES SYSTEMES TECHNIQUES 78
2.1 Les enjeux du clivage historique « bottom-up » vs. « top-down » *79*
2.2 Changement technique induit : un progrès inachevé *88*
3 L'ARTICULATION DU NORMATIF ET DU POSITIF : QUEL STATUT DONNER A L'OPTIMALITE ? 93
3.1 L'agent représentatif ou « les fondements micro des modèles macro » *93*
3.2 Anticipations parfaites : la mauvaise compréhension de la théorie des anticipations rationnelles *96*
3.3 La résistance de l'hypothèse d'optimalité : une question « d'ancrage » ou un abus de mathématiques ? *100*
4 CONCLUSION 102
RÉFÉRENCES 104

CHAPITRE 3 IMACLIM-R : UNE ARCHITECTURE DE SIMULATION POUR L'ÉVALUATION DE LA DURABILITE DES TRAJECTOIRES **111**

1 STRATEGIE DE MODELISATION ET STRUCTURE DU MODELE 114
1.1 La représentation de la croissance économique *114*
1.2 L'évolution des univers techniques *117*
1.3 Les modes d'anticipations et de décisions des agents économiques *120*
1.4 Agrégation régionale, sectorielle et Données *121*
2 DESCRIPTION DE L'EQUILIBRE STATIQUE 123
2.1 Demande des ménages en biens et services *123*
2.1.1 Revenu et épargne 123
2.1.2 Fonction d'utilité 124
2.1.3 Programme de maximisation 125
2.2 Contraintes de production et courbes d'offre *126*

2.3 Administrations ... *128*
2.4 Marché du travail ... *128*
2.5 Flux de capitaux et investissements ... *129*
2.5.1 Allocation régionale et internationale de l'épargne ... 129
2.5.2 Achat de biens d'équipement ... 131
2.6 Marchés des biens et commerce international ... *131*
2.7 Contraintes d'équilibre sur les flux physiques ... *133*
2.8 Choix d'un numéraire ... *133*
2.9 Émissions de gaz à effet de serre et taxe carbone ... *133*
2.9.1 Comptabilisation des émissions ... 133
2.9.2 Evolution des coefficients d'émissions ... 134
2.9.3 Taxe carbone ... 134
3 MODULES DYNAMIQUES : MOTEUR DE LA CROISSANCE ET CHANGEMENT STRUCTUREL ... 134
3.1 Le moteur de croissance: démographie, productivité et accumulation de capital ... *135*
3.1.1 Une dynamique démographique exogène ... 135
3.1.2 L'évolution de la productivité des facteurs ... 136
3.1.3 Formation de l'investissement et accumulation du capital ... 140
3.2 Changement structurel ... *142*
4 CONCLUSION ... 145
RÉFÉRENCES ... 147

CHAPITRE 4 IMACLIM-R : MODULES TECHNICO-ECONOMIQUES SECTORIELS HYBRIDES DANS UN CADRE D'EQUILIBRE GENERAL ... 149

1 PRODUCTION D'ENERGIE PRIMAIRE : DISPONIBILITE, PRODUCTION ET MISE SUR LE MARCHE DES RESSOURCES PETROLIERES ... 151
1.1 Une explication de la courbe de Hubbert ... *153*
1.1.1 Des découvertes dépendantes de deux mécanismes antagonistes ... 153
1.1.2 De la découverte à la production ... 155
1.1.3 Relier le modèle de Hubbert aux signaux économiques : l'apport du modèle LOPEX ... 157
1.2 Introduction des courbes du Hubbert dans le modèle IMACLIM-R ... *157*
1.2.1 Désagrégation des réserves de pétrole ... 157
1.2.2 Courbes de Hubbert et capacités de production ... 159
1.2.3 Comportements des producteurs ... 160
1.2.4 La formation des prix du pétrole ... 161
2 TRAITEMENT DES AUTRES COMBUSTIBLES FOSSILES ... 162
2.1 Production de gaz naturel et formation des prix ... *162*
2.2 Production de charbon et formation des prix ... *162*
3 TRANSFORMATION ENERGETIQUE : OFFRE ALTERNATIVE DE CARBURANTS LIQUIDES ... 163
3.1 Biocarburants ... *164*
3.1.1 Part de marché et contraintes d'offre ... 164
3.1.2 Formation du prix et structure de coût ... 165
3.2 Carburants synthétiques ... *166*
4 GENERATION D'ELECTRICITE : UNE OPTIMISATION SECTORIELLE SOUS CONTRAINTE DE COURBE DE CHARGE ... 167
4.1 Des technologies de production explicites détaillées en génération de capital ... *168*
4.2 La contrainte physique et temporelle de la courbe de charge ... *171*
4.3 Planification optimale des investissements en anticipation imparfaite ... *174*
4.3.1 Projection de demande et anticipation du prix des combustibles ... 174
4.3.2 Décision en amont des capacités de production fondées sur des énergies renouvelables non hydrauliques ... 175
4.3.3 Investissement prioritaire dans l'énergie hydroélectrique ... 176
4.3.4 Parc de production conventionnel ... 178
4.4 Composition de l'investissement courant : minimisation de la distance entre parc de production optimal anticipé et parc installé ... *180*
4.5 Du parc de production installé au coût moyen de production ... *182*
5 DEMANDES D'ENERGIE FINALE ... 184
5.1 Consommations intermédiaires d'énergie des secteurs productifs ... *184*
5.2 Usages résidentiels ... *187*
5.3 Transports ... *190*
5.3.1 Véhicules particuliers : stock et intensité énergétique ... 190
5.3.2 Autres moyens de transports : capacités et consommations d'énergie ... 193
5.3.3 Evolution de la demande de transport par les autres secteurs ... 194
6 CONCLUSION ... 195

RÉFÉRENCES 196

CHAPITRE 5 SCENARIO « LAISSER-FAIRE » : LES DETERMINANTS D'UN FUTUR TRES INTENSIF EN CARBONE 197

1 HYPOTHESES CENTRALES DU SCENARIO DE REFERENCE 200
1.1 Hypothèses macroéconomiques 201
1.1.1 Démographie 201
1.1.2 Productivité du travail 202
1.1.3 Disponibilité de l'investissement : taux d'épargne et flux de capitaux 203
1.2 Hypothèses énergétiques 204
1.3 Hypothèses de style de développement 205
1.3.1 Evolution du parc résidentiel 206
1.3.2 Evolution des équipements et infrastructures de transport 208
1.3.3 Besoins en fret de l'économie 209
2 DES HYPOTHESES DE SCENARIO A LA TRAJECTOIRE REALISEE : LES MECANISMES MOTEURS DE LA HAUSSE DES EMISSIONS 209
2.1 Un atterrissage progressif de la croissance mondiale avec rattrapage partiel des PED 211
2.2 Le contenu matériel et énergétique de la croissance reste élevé 215
2.3 Des tensions croissantes sur les marché énergétiques 218
3 CONCLUSION : UN RISQUE AVERE DE DERAPAGE DES EMISSIONS 221
REFERENCES 59

CHAPITRE 6 VERS UNE REEVALUATION DU COUT DES POLITIQUES DE REDUCTION DES EMISSIONS 225

1 LES ENJEUX DE LA REDUCTION DES EMISSIONS 228
1.1 La définition des objectifs de réduction 228
1.2 Les potentiels de réduction des émissions : entre technologies et signaux économiques 230
1.3 Les instruments de politiques de réduction 233
1.3.1 Un incontournable : donner un prix aux émissions de GES 233
1.3.2 Le compromis intéressant des instruments hybrides 236
1.4 Coûts de réduction et contenu des politiques : un consensus formel autour du prix unique ? 237
2 COUTS ET EFFICACITE DE SCENARIOS DE STABILISATION AVEC PRIX UNIQUE DU CARBONE 239
2.1 Hypothèses de politiques climatiques 240
2.1.1 Des enveloppes d'émissions de CO_2 d'origine fossile compatibles avec une stabilisation tous gaz à 450 et 550 ppm CO_2-éq 240
2.1.2 Une coordination mondiale fondée sur un prix du carbone universel 241
2.2 Bifurcation vers un système énergétique décarbonisé : potentiels et obstacles 242
2.2.1 Profil de prix du carbone : un révélateur des contraintes dynamiques 242
2.2.2 Réductions d'émissions par secteurs : un aperçu des flexibilités et des blocages 245
2.2.3 Contributions régionales à l'effort de réduction global 250
2.3 Bilan macroéconomique : une transition impossible ? 253
2.3.1 Chronogramme des pertes : deux décennies de transition coûteuse 254
2.3.2 Un bilan positif à long terme lié à une meilleure anticipation de « l'après-fossiles » 262
2.3.3 Incertitudes autour des stratégies des producteurs de fossiles en réaction aux politiques climatiques mondiales 263
3 CONCLUSION 266
REFERENCES 268

CHAPITRE 7 FUTUR REGIME DE COORDINATION DES EFFORTS : QUEL COMPROMIS INSTITUTIONNEL ENTRE VULGATE ECONOMIQUE ET ASPERITES DU MONDE REEL ? 271

1 QUELLES COMPENSATIONS POUR UN PRIX UNIQUE ACCEPTABLE ? 274
1.1 Transferts internationaux et redistribution infra-nationale 274
1.2 Règle d'allocation des quotas : Un compromis impossible ? 275
1.3 Effet levier du recyclage des revenus « carbone » 280
2 QUAND EQUITE ET EFFICACITE NE SONT PLUS SEPARABLES : VERS UNE DIFFERENTIATION DES COUTS MARGINAUX 282
2.1 Pour un dialogue renouvelé entre vulgate économique et prise de décisions dans le monde réel 282
2.2 Une différenciation régionale justifiée par la difficulté d'organiser les transferts internationaux 284
2.2.1 Une minimisation des pertes de bien-être sans transferts de compensation 284
2.2.2 Une évaluation numérique de la règle de différenciation régionale sans transferts 287

2.2.3 Une différentiation régionale avec un accord sectoriel sur l'industrie 291
2.3 Une différenciation sectorielle pour tenir compte des hétérogénéités d'inertie ..... et des anticipations limitées 295
2.3.1 Dynamiques sectorielles hétérogènes et anticipations limitées : une autre raison de différenciation ..... des valeurs du carbone 295
2.3.2 Evaluation d'une différenciation sectorielle 299
3 D'UNE CONTRAINTE CARBONE « PURE » A UNE REORIENTATION PROFONDE ..... VERS UNE TRAJECTOIRE DURABLE 304
3.1 Un écart persistant entre la modélisation et les enjeux du développement durable..... 304
3.2 Eviter le mimétisme des styles de développement 307
3.3 Un scénario de développement non-mimétique : leçons et pistes de recherche..... 310
4 CONCLUSION 318
REFERENCES 321

CONCLUSION GENERALE 323

BIBLIOGRAPHIE GENERALE..... 323

Liste des Figures

Figure 1 : Scénarios contenues dans la base de données IPCC-NIES et publications associées, par date de création et de parution 28
Figure 2 : Projection des émissions mondiales de CO_2 issues des combustibles fossiles et de l'industrie 31
Figure 3 : Émissions de CO_2 des scénarios « SRES » 35
Figure 4 : Paysage des modèles mentionnés dans la base de données IPCC 51
Figure 5 : Taux moyens de productivité horaire 71
Figure 6 : Croissance économique de long-terme – deux points de vue différents 77
Figure 7 : structure de production des secteurs Industries et Services dans EPPA 4 (Paltsev. et al. 2005) 81
Figure 8 : Evaluation en trois dimensions des modèles énergie-économie 86
Figure 9 : Architecture récursive du modèle IMACLIM-R 115
Figure 10 : Equilibres sous-optimaux et croissance potentielle 117
Figure 11: Un dialogue itératif « top-down / bottom-up » 120
Figure 12 : Rendements statiques décroissants 127
Figure 13 : courbe salaire-chômage 129
Figure 14 : Valeurs (Revenu PPA par habitant, $\xi_{agriculture}$) pour les douze régions du modèle à l'année de référence et courbe de tendance estimée. 144
Figure 15 : Découvertes de pétrole décalées de 35 ans et production aux Etats Unis (hors Alaska) 155
Figure 16 : Profil des découvertes de pétrole et de la production pour le Moyen Orient et courbe de Hubbert calibrée sur les découvertes (Source : Rehrl et Friedrich (2006)) 156
Figure 17 : Classification des réserves de pétrole par région et catégorie de coût d'extraction. 158
Figure 18 : Recalibrage de la courbe de Hubbert des capacités en cas de sous-exploitation 160
Figure 19 : Exemple d'évolution des capacités de production d'une région 161
Figure 20 : Evolution des courbes d'offre mondiales pour la production d'éthanol et de biodiesel au cours du temps, source AIE (2006). 165
Figure 21 : Courbe de charge du 20 mars 2008. 172
Figure 22 : Exemple de monotones de puissance et méthode d'approximation. 173
Figure 23 : Exemple de répartition des capacités hydroélectriques anticipées pour répondre aux capacités appelées dans la monotone de puissance. 177
Figure 24 : Exemple de calcul des durées d'utilisation annuelles pour cinq technologies différentes classées par coût de production variable croissant 183
Figure 25 : Schéma de décomposition des changements de consommations intermédiaires d'énergie 185
Figure 26 : Réduction de l'intensité énergétique sectorielle modélisée par l'AAEE 186
Figure 27 : Gains d'efficacité induits par la taxe carbone 186
Figure 28 : Evolution de l'élasticité-revenu α_k en fonction du taux de motorisation. 191
Figure 29 : Effet de l'extension des capacités sur l'efficacité marginale en temps des transports 193
Figure 30 : Population totale (Milliards d'habitants) 201
Figure 31 : Ratio de la population active sur la population totale 202
Figure 32 : Evolution des PIB par habitant en fonction de celle du PIB PPA par habitant 207
Figure 33 : Emissions régionales 209
Figure 34 : Trajectoire d'émissions de référence d'IMACLIM-R et scénarios SRES sélectionnés 211
Figure 35 : Contribution des pays/régions à la croissance mondiale en 2006 et 2007 (IMF, 2007, *xi*) 212
Figure 36 : Taux de croissance effectif de la productivité agrégée du travail à l'échelle régionale 213
Figure 37 : Coefficient de Gini mondial – évolution historique (source : Melchior, 2001) 214
Figure 38 : Evolution de la répartition des revenus mondiaux (résultats IMACLIM-R PPA) 214
Figure 39 : Evolution des besoins énergétiques unitaires par m2 (résultats IMACLIM-R) 217
Figure 40 : Mobilité totale motorisée par habitant en fonction du PIB par habitant (échelle logarithmique) 218
Figure 41 : Demande totale d'énergie primaire par habitant, 2000 et 2050, scénario de référence. 219
Figure 42: prix mondiaux des ressources fossiles 220
Figure 43 : Evolution de la production de carburants liquides 220
Figure 44 : Croissance récente des émissions de CO_2 et scénarios SRES (Raupach et al., 2007) 222
Figure 45 : Trajectoires d'émissions correspondant aux différentes catégories de scénarios de stabilisation des concentrations de GES (GIEC, SPM WGIII, p. 16) 230
Figure 46 : Potentiel économique de mitigation dans différents secteurs en 2030, toutes trajectoires de référence confondues (GIEC, 2007, SPM WG III) 233
Figure 47 : Relation entre le prix du carbone et les réductions d'émissions de CO_2 par rapport au scénario de référence en 2050, tirée d'une sélection de littérature publiée depuis le 3ème rapport d'évaluation 238

Figure 48 : Trajectoire de référence et enveloppe d'émissions pour une stabilisation à 450 ppm CO_2 240
Figure 49 : Profils du prix du CO_2 et trajectoires d'émissions 242
Figure 50 : Effets des hypothèses du modèle IMACLIM-R sur le profil du carbone..... 243
Figure 51 : Courbe de pénétration en 'S' des technologies innovantes (Foxon et al., 2005) 244
Figure 52 : Mix technologique de la production électrique – scénario 550 ppm 247
Figure 53 : Emissions mondiales par secteur dans les trois scénarios..... 249
Figure 54 : émissions par habitant..... 252
Figure 55 : Inégalité mondiale de répartition des émissions de GES en fonction de la population 252
Figure 56 : Chronogramme des pertes de PIB réel, USA Europe et OCDE Pacifique 256
Figure 57 : Chronogramme des pertes de PIB réel, Chine et Inde 256
Figure 58 : Chronogramme des pertes de PIB réel, CEI, Moyen-Orient et Canada..... 257
Figure 59 : Chronogramme des pertes de PIB réel, Brésil, Afrique, Reste de l'Asie et Reste de l'Amérique Latine 257
Figure 60 : Intensité carbone du PIB par régions en 2005 et en 2025 dans les trois scénarios 258
Figure 61 : Energies fossiles consommées par le secteur électrique en Chine et en Inde, REF et 550 ppm..... 259
Figure 62 : Hausse du fardeau énergétique pendant la transition [2015, scénarios 450 et 550 ppm CO2-eq] : .. 260
Figure 63 : Ratio des variations des exportations de pétrole et gaz en valeurs par rapport au PIB de référence pour les régions Canada, CEI et Moyen-Orient, scénario 550 ppm CO2-éq 264
Figure 64 : Evolutions des productions de pétrole au Moyen-Orient et dans le reste du Monde, scénario de référence et scénario 550 ppm..... 264
Figure 65 : Ratio des variations des exportations de pétrole et gaz en valeurs par rapport au PIB de référence pour les régions Canada, CEI et Moyen-Orient, scénario 450 ppm CO2-éq 265
Figure 66 : Prix international du pétrole, scénarios Référence, 550 ppm CO2-eq, 450 ppm CO2-eq 265
Figure 67 : forme générique d'une règle d'allocation de quotas (Lecocq et Crassous, 2002)..... 277
Figure 68 : Mise en perspective des régimes d'exemption, d'équité et d'égalité (Ringius et al, 2000)..... 278
Figure 69 : Perception hétérogène de la taxe unique, en parités de pouvoir d'achat..... 285
Figure 70 : Comparaison des pertes de PIB réel par rapport au scénario de référence, 450 ppm CO2eq 290
Figure 71 : Pertes de bien-être mondial par rapport au scénario de référence..... 291
Figure 72 : Comparaison des pertes de PIB réel par rapport au scénario de référence, taxes différenciées par régions, avec ou sans accord sectoriel sur l'industrie, 450 ppm CO2-eq 294
Figure 73 : Profils de taxe sectoriels en Chine 301
Figure 74 : Pertes de PIB liées à l'application d'un profil de prix du carbone différencié par secteurs..... 302
Figure 75 : Effet de masque de l'horizon temporel des modèles sur le rebonds des émissions 306
Figure 76 : Profils de prix du carbone en Chine et en Inde avec politiques d'infrastructures..... 314
Figure 77 : Transport individuel en véhicules particuliers (VP) et transports collectifs (OT), scénarios mimétique et non-mimétique, Chine, 2000-2050..... 315
Figure 78 : Evolution de la mobilité en Inde – scénarios mimétique et non mimétique, 450 ppm CO_2-eq 315
Figure 79 : Consommation finale des ménages en carburants fossiles 316
Figure 80 : bilan macroéconomique des politiques de réduction, scénarios mimétique et non-mimétique, Inde et Chine, 2000-2050..... 317

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Budget carbone 2000-2100 à partir de différents paramétrages de l'identité de Kaya 36
Tableau 2 : Liens d'interdépendance entre les termes de l'identité de Kaya 37
Tableau 3 : Taxonomies successives des modèles de simulation de long terme 46
Tableau 4 : Modèles et Nombre des scénarios associés (698 scénarios) 50
Tableau 5 : Modes de représentation de la croissance économique globale selon les familles de modèles 65
Tableau 6 : Forces et faiblesses des paradigmes BU et TD 85
Tableau 7 : Implications des modes de représentation du changement technique 91
Tableau 8 : Agrégation régionale du modèle IMACLIM-R 121
Tableau 9 : Agrégation sectorielle du modèle IMACLIM-R 122
Tableau 10 : Calibrage des niveaux de productivité du travail pour les secteurs 1 à 6 137
Tableau 11 : Calibrage des niveaux de productivité du travail pour les secteurs 7 à 12 139
Tableau 12 : Taux d'épargne régionaux à l'année de référence 141
Tableau 13 : Réserves de pétrole ultimement exploitables en 2001 158
Tableau 14 : Paramètres technico-économiques pour les technologies de production électrique pour la région des Etats Unis en 2001. 169
Tableau 15 : Taux de croissance moyen de la population totale et active sur la période 2005-2050 202
Tableau 16 : Taux d'épargne régionaux en 2001 204
Tableau 17 : Surface de logement (m^2 par habitant) 206
Tableau 18 : Surface résidentielle construite (M^{ards} de m^2 par an, démolition 1,5% par an incluse) 207
Tableau 19 : Equipements des ménages en véhicules particuliers (véhicule par habitant) 208
Tableau 20: Comparaison du scénario de référence avec les scénarios SRES A1C, A1G et A2 210
Tableau 21 : Taux de croissance annuel moyen du PIB réel (PPA) 212
Tableau 22 : Contribution à la croissance mondiale 212
Tableau 23 : Structure du PIB par région 216
Tableau 24 : Evolution du transport motorisé par habitant entre 2000 et 2050 (pkm) 218
Tableau 25 : Implications aval et amont des différentes cibles de stabilisation 229
Tableau 26 : Points de passage tous les dix ans pour une stabilisation à 450 et 550 ppm CO2-eq 241
Tableau 27 : Contribution des différents secteurs aux réductions d'émissions cumulées 246
Tableau 28 : Réductions des émissions de GES par rapport au scénario de référence 250
Tableau 29 : Pertes actualisées de PIB réel (PPA) par rapport au scénario de référence sur la période 2010-2050 253
Tableau 30 : Taux de croissance annuel moyen du PIB réel, 2010-2030 et 2030-2050 255
Tableau 31 : Investissement cumulé additionnel dans le secteur électrique, scénario 550 ppm CO2-eq 262
Tableau 32 : Variation des capacités de production électrique, 550 ppm CO2-eq vs. Référence 262
Tableau 33: Classification des principes d'équité selon le 3ème rapport du GIEC 276
Tableau 34 : Synthèse des principales règles d'allocation proposées dans la littérature 279
Tableau 35 : Pertes actualisées de PIB réel (PPA) par rapport au scénario de référence sur la période 2010-2050, scénario 450 ppm CO2-eq avec deux modes de recyclage 281
Tableau 36 : Comparaison des trajectoires de taxes différenciées et de taxe unique 289
Tableau 37 : Variations de la production de biens industriels entre le scénario de taxe unique et le scénario de taxes différenciées 292
Tableau 38 : Hétérogénéité des spécificités sectorielles 300
Tableau 39 : Coefficient multiplicateur des indicateurs d'activité sous contrainte carbone « mimétique » entre 2000 et 2050 : passagers-kilomètres en véhicules particuliers et production du secteur industrie 311

Introduction générale

Longtemps cantonné à des débats d'experts et des négociations en haut lieu, le sujet de la lutte contre le changement climatique fait désormais partie intégrante d'une majorité de programmes politiques, de stratégies économiques ou de revendications sociales, de la scène internationale jusqu'aux échelons de décision locaux. Mais cette récente omniprésence, aussi encourageante soit-elle pour tous ceux qui sont convaincus qu'une mobilisation large et urgente est nécessaire[1], est encore loin de ressembler à une mobilisation univoque et massive, car elle se déploie par le biais d'une multitude hétéroclite de rapports, conférences internationales, déclarations, alertes et engagements, peu éclairante pour n'importe quel citoyen du monde. Dans la période charnière que nous vivons, où l'expression affirmée d'une volonté d'action collective doit encore être convertie en politiques et mesures effectives et efficaces, une grande confusion règne sur la faisabilité des engagements les plus volontaristes et sur les moyens les plus adéquats pour y arriver.

En amont, les communautés d'experts du cycle du carbone et du climat ont récemment rehaussé d'un cran leur alerte à la dangerosité d'une dérive mal contrôlée des émissions de gaz à effet de serre (GIEC, 2007 ; Hansen et al. 2008), tandis que l'examen des tendances récentes des émissions mondiales ne laisse entrevoir aucune amélioration globale dans la dernière décennie (Raupach et al., 2007). Les diagnostics les plus récents confirment ainsi l'ampleur et l'urgence d'une stabilisation des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre en vue d'éviter un changement climatique dangereux, un défi clairement formulé il y a déjà 16 ans par la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (article 2).

Du côté des solutions, les pistes d'action sont plus brouillonnes. L'expérience des dix dernières années suscite deux diagnostics contraires, l'un insistant sur le bénéfice des acquis institutionnels du protocole de Kyoto ou du système européen de quotas échangeables (Stern, 2006), l'autre pointant le caractère anecdotique et très partiel des réductions effectuées jusque là ou l'échec manifeste du système européen, ayant abouti à un prix spot du carbone nul fin 2007 (Victor, 2001 ; Prins et Rayner, 2007). Dans ce contexte, les discussions internationales sur l'après-2012, dont l'enjeu n'est rien de moins que d'initier avant 2020 une véritable bifurcation des émissions mondiales, semblent achopper sur les mêmes obstacles que dix ans auparavant : la difficulté de convaincre les grands pays émergents ou les Etats-Unis de prendre des engagements contraignants, des positions politiques très contrastées sur les niveaux de réduction à réaliser, les questions épineuses liées aux transferts de capitaux ou de technologies, à la déforestation évitée, etc. En particulier, la recherche d'un compromis efficace bute toujours contre la dichotomie tenace entre les approches *top-down* plébiscitant une grande architecture de type « Kyoto élargi » et les approches *bottom-up* qui voient une solution dans l'agrégation progressive d'initiatives multiples et autonomes (Hourcade et al., 2006). Le paysage politique fournit d'ailleurs une illustration frappante de ce contraste, avec, par exemple, d'un côté l'enthousiasme volontariste qu'ont les dirigeants européens à afficher des objectifs globaux de moyen et long terme (de -20 à -30% en 2020, de -50 à -80% en 2050) et de l'autre l'affichage très modéré de politiques et mesures diverses aux résultats cumulés incertains dans les pays hors Kyoto (USA, Chine, Inde). L'écart est tel entre ces deux positionnements que l'on ne peut s'empêcher de penser qu'ils sont supportés par des visions diamétralement opposées des coûts des politiques de réduction, les uns étant forcément confiants dans les hypothèses de coûts faibles publiées dans la littérature (GIEC, 2007), les autres probablement convaincus, au contraire, qu'il existe des risques de coûts trop élevés.

[1] 65% de la population des 14 pays les plus émetteurs de gaz à effet de serre affirmeraient qu'il faut prendre des mesures importantes très prochainement, selon un récent sondage international commandité par la BBC (2007).

Il faut reconnaître que la communauté des économistes de l'énergie et du changement climatique est en partie responsable de cette confusion et des blocages persistants, à cause des résultats qu'elle véhicule de manière quasiment univoque. Le récent Résumé pour les Décideurs du quatrième rapport d'évaluation du GIEC (2007) affiche des projections de coût global de réduction pour les objectifs de stabilisation les plus rigoureux que l'on peut qualifier d' « encourageantes » :

> « In 2030 macro-economic costs for multi-gas mitigation, consistent with emissions trajectories towards stabilization between 445 and 710 ppm CO_2-eq, are estimated at between a 3% decrease of global GDP and a small increase, compared to the baseline. However, regional costs may differ significantly from global averages. (*high agreement, medium evidence*)
> […]
> In 2050 global average macro-economic costs for multi-gas mitigation towards stabilization between 710 and 445 ppm CO_2-eq are between a 1% gain to a 5.5% decrease of global GDP. For specific countries and sectors, costs vary considerably from the global average. *(high agreement, medium evidence)* » (pp. 11 et 18).

Hormis le fait que l'appréciation de ces chiffres est du ressort des jugements de valeurs propres à chaque groupe de décideurs ou aux opinions publiques, notamment en comparaison avec les risques liés à un changement climatique mal maîtrisé, il existe de « bonnes » raisons pour lesquelles on peut craindre des coûts plus élevés. En particulier, comme le précise explicitement le même rapport du GIEC un peu plus loin, ces évaluations de coûts résultent majoritairement de modèles d'optimisation ou de modèles de simulation représentant un monde théorique sans erreurs d'anticipation ni imperfections de marché :

> « Most models use a global least cost approach to mitigation portfolios and with universal emissions trading, assuming transparent markets, no transaction cost, and thus perfect implementation of mitigation measures throughout the 21st century. » (p. 8)

Cette précision méthodologique est loin d'être anodine puisqu'elle explique que toutes les évaluations de coûts ne sont valables que dans le cas « parfait » dans lesquels dirigeants et agents économiques sont tous également volontaires et éclairés. Au-delà du caractère presque caricatural de cette précaution, il faut souligner que la quasi-totalité des travaux économiques actuels échouent ainsi à fournir deux renseignements cruciaux pour nos décideurs dans la définition de leurs engagements de réduction :

- Quelles sont les stratégies robustes aux incertitudes réelles sur la croissance future, les réserves de ressources fossiles, le progrès technique, les coûts d'implémentation, de transaction, d'infrastructures et d'équipements ?

- Quels sont les programmes ambitieux qu'il faut lancer simultanément et sans délai pour respecter les points de passage par lesquels les économies doivent passer pour respecter telle ou telle trajectoire d'émissions, en termes de déploiement de nouvelles technologies, de développement d'infrastructures, de rénovation des bâtiments, etc. ?

Certes, la littérature économique n'ignore pas ces deux questions et tente d'y répondre, par exemple en cherchant des compromis institutionnels susceptibles de sécuriser les coûts de réduction (Pershing et Philibert, 2002), ou encore en tentant des exercices de *backcasting* sur les trajectoires de réduction des émissions (Fujino et al., 2008). Mais l'absence, dans le résumé du rapport du GIEC, d'un diagnostic plus pragmatique que celui que nous avons rappelé ci-dessus soulève un

questionnement de fond sur l'usage des modèles d'évaluation des politiques de réduction, car ce sont bien ici les modèles utilisés, ainsi que les hypothèses qui y sont incorporées, qui déterminent le caractère relatif et partiel des évaluations de coûts recensées par le GIEC.

Depuis le début des années 70, la modélisation numérique, constamment facilitée par les progrès exponentiels du calcul informatique, occupe une place centrale dans la boîte à outils des économistes, notamment dans le champ du climat et de l'énergie. A partir de cette époque, les développements des modèles d'équilibre général (Arrow et Debreu, 1954), de l'analyse d'activités (Koopmans et al., 1951) ou des systèmes dynamiques (Forrester 1961, 1968), ont en effet pu prendre un essor numérique sans précédent et être utilisés par une large part de la communauté des économistes. Depuis, la place des modèles numériques dans l'évaluation économique et l'aide à la décision n'a cessé de croître, aussi grâce au développement et à l'amélioration continus des bases de données quantitatives. La contribution première des modèles numériques est de permettre l'accès à des résultats de modèles inaccessibles analytiquement ou mentalement : il peut s'agir de simuler les états successifs de systèmes complexes, qui incluent des effets de rétroaction nombreux et non triviaux, ou de rechercher les extrema d'une fonction objectif lorsqu'il s'agit de modèles d'optimisation. Grâce à cette possibilité de calcul complexe, le recours aux modèles a ouvert de nombreuses voies d'aide à la décision largement explorées depuis trente ans : projection de trajectoires futures cohérentes, examen des incertitudes, évaluation des politiques et mesures, recherche de stratégies optimales, appui au dialogue d'experts. Il suffit par exemple d'examiner les développements entrepris dans le cadre de l'Energy Modeling Forum depuis sa création en 1978 pour mesurer l'étendue des efforts entrepris pour mettre la modélisation au service de l'aide à la décision.

Il est alors légitime de s'interroger sur l'insatisfaction que nous rapportions ci-dessus, à propos de l'éclairage partiel que les outils existants apportent sur le monde réel : pourquoi cette insatisfaction persiste-elle durablement malgré la situation actuelle caractérisée par une abondance de modèles, des conditions largement favorables au développement d'outils innovants et une demande pressante d'évaluations robustes de la part des décideurs ?

Cette interrogation est un « fil rouge » de long terme dans les recherches menées au CIRED depuis le début des années 90. Les thèses soutenues successivement par Jean-Charles Hourcade (1984), Thierry Chapuis (1996), Minh Ha-Duong (1998), Franck Lecocq (2000), Frédéric Ghersi (2003) Philippe Ambrosi (2004), Vincent Gitz (2004), Stéphane Hallegatte (2005), Patrice Dumas (2006) ou encore Damien Demailly (2008) partagent toutes cette conception de la modélisation économique comme un outil d'éclairage pragmatique du monde réel et de l'évaluation des politiques publiques. Plus précisément, les travaux sur le modèle de statique comparative IMACLIM-S (Ghersi, 2003) ont été les précurseurs des développements présentés dans cette thèse, en proposant une traduction numérique opérationnelle des idées d'hybridation que nous avons ensuite reprises dans le cadre dynamique du modèle IMACLIM-R que nous avons ensuite développé.

La thèse présentée ici repart de ce questionnement pour (i) identifier les sources d'insatisfaction vis-à-vis du « parc » de modèles existants, (ii) élaborer une architecture de modélisation innovante qui vise à répondre à une partie des insatisfactions et (iii) proposer des pistes d'évaluation des politiques climatiques qui répondent aux besoins de stratégies robustes et de plans d'action détaillés des décideurs.

Le chapitre 1 dresse un bilan critique de l'activité de modélisation dans le champ des politiques climatiques. Nous y soulignons que l'abondance et la dispersion des scénarios de long terme existants masquent en fait un faible contrôle des incertitudes et de la cohérence interne des trajectoires produites, ainsi qu'un nombre très restreint de paradigmes de modélisation, que nous resituons dans la chronologie de la recherche quantitative sur les politiques énergétiques et climatiques.

Le chapitre 2 poursuit l'analyse des pratiques de modélisation en creusant les hypothèses, les méthodes et les spécifications *internes* des paradigmes de modélisation identifiés dans le premier chapitre. Dans une approche transversale aux différents types de modèles, notre diagnostic s'organise autour de trois sujets d'insatisfaction : la représentation de la croissance économique à court et long terme, la description des univers techniques et de leurs dynamiques, et enfin le statut de l'optimalité dans les modèles. En filigrane de cette évaluation se dessine un cahier des charges pour le développement d'outils innovants susceptibles de repousser les limites des modèles existants.

Les chapitres 3 et 4 présentent l'architecture de modélisation IMACLIM-R, conçue pour répondre à une partie des insatisfactions relevées aux chapitres précédents. Il s'agit d'un modèle de simulation récursif, articulé autour d'un calcul d'équilibre général statique et de modules dynamiques technico-économiques permettant une cohérence étroite entre les dynamiques macroéconomiques et les contraintes techniques tout au long des trajectoires simulées. Le chapitre 3 présente la philosophie du modèle et la structure de l'équilibre statique, tandis que le chapitre 4 détaille les modules technico-économiques, qui sont les lieux dédiés à l'intégration des informations technico-économiques. La version du modèle présentée ici est une version mondiale, qui inclut 12 régions et 12 secteurs, et permet de simuler avec un pas de temps annuel des trajectoires à 2050 voire 2100.

Le chapitre 5 décrit l'élaboration d'un scénario « laissez-faire » sans politiques climatiques, motivée par la double intention de démontrer les perspectives ouvertes par ce modèle pour la simulation de trajectoires de long terme et de mettre en exergue les risques de dérive des émissions dans un scénario issu d'hypothèses médianes sur la croissance, le progrès technique et les dynamiques de développement, à l'horizon 2050.

Le chapitre 6 fait émerger des pistes de réévaluation des trajectoires économiques qui permettraient de stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre de long terme, grâce aux innovations du modèle IMACLIM-R. Nous calculons deux trajectoires visant une stabilisation à 550 et 450 ppm CO_2-equivalent en supposant qu'un prix du carbone uniforme peut être instauré simultanément dans toutes les régions du modèle. Cet exercice nous permet de souligner d'une part que ces trajectoires peuvent exiger un profil du carbone « concave » avec une montée rapide du signal prix dans les deux décennies à venir, et d'autre part qu'un tel profil de contrainte sur les émissions comporte des risques de coûts de transition élevés pendant deux décennies.

Le chapitre 7 vise à esquisser des pistes d'ajustement et de raffinement des politiques climatiques qui pourraient permettre de limiter de manière robuste les risques de coûts de transition mis en évidence au chapitre 6. Ces pistes sont aussi présentées comme des moyens de réconcilier les recommandations épurées de la théorie économique avec les hétérogénéités et imperfections du monde réel dans lequel les décideurs négocient leurs engagements et élaborent leurs politiques. Dans cette perspective, nous discutons et évaluons numériquement la pertinence d'une différenciation d'abord régionale puis sectorielle des signaux-prix sur les émissions de gaz à effet de serre. Puis nous insistons sur le levier complémentaire que représenteraient des politiques et mesures visant à bifurquer vers des styles de développement « non-mimétiques » dans les pays émergents, en illustrant cette proposition d'une simulation intégrant des choix alternatifs de développement d'infrastructures de transport.

La tâche principale des travaux regroupés dans cette thèse a été le développement du modèle IMACLIM-R, une entreprise de grande envergure qu'il aurait été impossible de mener seul si loin en seulement cinq ans. Tout d'abord, la page n'était pas tout à fait blanche en 2003 puisque le défi avait déjà mobilisé l'énergie et la pugnacité de Vincent Gitz et Philippe Ambrosi, dont le travail de débroussaillage numérique sur l'ancêtre *EGPEN* a été très précieux, servant de point de départ à mon propre tâtonnement. Ensuite, l'accélération du développement du modèle, jusqu'à sa version actuelle présentée dans cette thèse, n'a été possible qu'avec l'importante contribution d'Olivier Sassi en 2004, co-développeur du modèle, ainsi qu'avec les contributions additionnelles de Meriem Hamdi-Cherif, Sandrine Mathy, Céline Guivarch, Vincent Gitz et Henri Waisman. Du fait du binôme resserré que nous avons constitué avec Olivier Sassi pendant quatre ans, la thèse présentée ici entretient un lien de consanguinité étroit avec la thèse de doctorat qu'il présente en parallèle de celle-ci, thèse qui vise à examiner le rôle du progrès technique induit dans les politiques climatiques. Reflets de la communauté de travail qui a caractérisé le développement du modèle durant ces trois dernières années, les chapitres 3 et 4 ont été écrits sur une base commune au fur et à mesure du développement du modèle. Bien sûr, cette entreprise de modélisation doit être poursuivie de manière soutenue, car la version du modèle présentée ici comporte de nombreuses limites que nous souhaiterions dépasser. Dans cet esprit, la construction de l'architecture et son déploiement opérationnel dans la version à 12 régions et 12 secteurs permettent aujourd'hui d'alimenter une dynamique de recherche collective, supportée par un élargissement continu de l'équipe.

Références

Ambrosi, P., 2004, *"Amplitude et calendrier des politiques de réduction des émissions face aux risques climatiques : leçons des modèles intégrés"*, Thèse de Doctorat, Sciences Économiques : Hourcade, J-C : (dir.) : Paris, EHESS, 375 p.

Arrow, K. J., Debreu, G., 1954, "The Existence of an Equilibrium for a Competitive Economy", *Econometrica*, vol. XXII (3), 265-90.

Chapuis, T., 1996, *"Les problèmes de décisions et le changement global : les leçons de la modélisation en économie de l'énergie"*, Thèse de Doctorat, Sciences Économiques : Hourcade, J-C : (dir.) : Paris, EHESS, 366pp.

Demailly, D., 2008, "C*ompétitivité et fuites de carbone dans l'industrie sous politique climatique asymétrique"*, Thèse de doctorat, Economie de l'Environnement : Hourcade J.-C. (dir.), Paris, EHESS, 278 p.

Dumas, P., 2006, *"L'évaluation des dommages du changement climatique en situation d'incertitude : l'apport de la modélisation des coûts de l'adaptation"*, Thèse de Doctorat, Économie de l'environnement : Hourcade, J-C (dir.) : Paris, EHESS, 245 p

Forrester, J. W., 1961. *Industrial Dynamics*, Waltham, MA: Pegasus Communications, 464 pp.

Forrester, J. W., 1968, *Principles of Systems*, (2ème édition). Waltham, MA: Pegasus Communications, 391 pp.

Fujino, J., Hibino, G., Ehara, T., Matsuoka, Y., Masui, Y., Kainuma, M., 2008, "Back-casting analysis for 70% emission reduction in Japan by 2050", *Climate Policy*, special supplementary issue, Volume 8(S), June 2008, 'Modelling Long-term Scenarios for Low Carbon Societies'

Ghersi, F., 2003, *"Changement technique et double dividende d'écotaxes : un essai sur la confluence des prospectives énergétique et macro-économique"*, Thèse de Doctorat : Sciences Economiques : Hourcade J-C (dir.) : Paris, EHESS, 289 p.

GIEC, 2007: *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., 851 pp.

Gitz, V., 2004, *"Changement d'usage des terres et politiques climatiques globales"*, Thèse de Doctorat, Science de l'environnement : Hourcade J-C, (dir.) : Paris, ENGREF, 450 p.

Ha Duong, M., 1998, *"Comment tenir compte de l'irréversibilité dans l'évaluation intégrée du changement climatique ?"*, Thèse de Doctorat : Économie, Hourcade J-C (dir.) : Paris, EHESS, 257 p. + annexes, 148 p.

Hallegatte, S., 2005, *"Interactions d'échelles en économie : application à l'évaluation des dommages économiques du changement climatique et des évènements extrêmes"*, Thèse de Doctorat, Sciences Économiques : Hourcade J-C (dir.) : Paris, EHESS, 298 p

Hansen, J., Mki. Sato, R. Ruedy, P. Kharecha, A. Lacis, R.L. Miller, L. Nazarenko, K. Lo, G.A. Schmidt, G. Russell, I. Aleinov, S. Bauer, E. Baum, B. Cairns, V. Canuto, M. Chandler, Y. Cheng, A. Cohen, A. Del Genio, G. Faluvegi, E. Fleming, A. Friend, T. Hall, C. Jackman, J. Jonas, M. Kelley, N.Y. Kiang, D. Koch, G. Labow, J. Lerner, S. Menon, T. Novakov, V. Oinas, Ja. Perlwitz, Ju. Perlwitz, D. Rind, A. Romanou, R. Schmunk, D. Shindell, P. Stone, S. Sun, D. Streets, N. Tausnev, D. Thresher, N. Unger, M. Yao, and S. Zhang, 2007, Dangerous human-made interference with climate: A GISS modelE study., *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 2287-2312.

Hourcade, J.-C., 1984, "*Prospective de l'énergie et stratégies de développement dans le tiers monde*", Thèse de Doctorat d'Etat en Sciences Economiques, Université Paris VIII Vincennes à Saint-Denis, octobre.

Hourcade, J.-C., Shukla, P.R., Mathy, S., 2006, Untying the Climate-Development Gordian Knot – Economic Options in a Politically Constrained World, in R. Guesnerie, H. Tulkens, (eds.), *The Design of Climate Policy*, MIT Press, 19 p., in press.

Koopmans, T., 2001, *Activity Analysis of Production and Allocation*, Volume 13 of Cowles Commission Monograph, pages 33--97. John Wiley & Sons, New York, 1951

Lecocq, F., 2000, *"Distribution spatiale et temporelle des coûts de politiques publiques sous incertitudes. Théorie et pratique dans le cas l'effet de serre"*. Thèse de Doctorat : Sciences de l'Environnement : Hourcade, J-C (dir.) : Paris, ENGREF

Philibert, C., Pershing, J., 2002, "*Beyond Kyoto, Energy Dynamics and Climate Stabilisation*", Organisation for Economic Co-operation and Development and International Energy Agency, Paris, 164 pp.

Prins, G., Rayner, S., 2007, "Time to ditch Kyoto", *Nature* 449, 973-975 (25 October 2007)

Raupach M.R., Marland, G., Ciais, P., Le Quéré, C., Canadell, J.G., Klepper, G. Field, C. B., 2007, "Global and regional drivers of accelerating CO_2 emissions", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, May 22, 2007

Sassi, O., 2008, "*L'impact du changement technique endogène sur les politiques climatiques*", Thèse de Doctorat : Sciences Economiques : Hourcade J-C (dir.), Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 278 pp.

Stern, N. H., 2006, "*The Economics of Climate Change: The Stern Review*", Great Britain Treasury, Cambridge University Press, 2007, 692 pp.

UNFCCC, 1992, UN Framework Convention on Climate Change, Palais des Nations, Geneva, http://www.unfccc.de/index.html,

Victor, D. 2001, "*The Collapse of the Kyoto Protocol and the Struggle to Slow Global Warming*". Council on Foreign Relations. Princeton, NJ: Princeton University Press

Chapitre 1

La Modélisation de Long Terme : Etat de l'art et Taxinomie des Outils Disponibles

'Though not all of us are going to be model builders, we all are becoming model consumers, regardless of whether we know it (or like it). […] During our lives, each of us will be faced with the result of models and will have to make judgments about their relevance and validity. Most people, unfortunately, cannot make these decisions in an intelligent and informed manner, since for them computer models are *black boxes*: devices that operate in completely mysterious ways […] if modeling is to become a rational tool of the general public, rather than remaining the special magic of a technical priesthood, a basic understanding of models must become more widespread.' (John D. Sterman, Director of the MIT System Dynamics Group, 1991, p. 3)

Le résultat le plus « visible » des travaux de modélisation est la profusion de scénarios accumulé par les nombreuses études et expertises sur les questions énergétiques ou climatiques depuis bientôt quarante ans. Dans les années 70, les deux chocs pétroliers provoquèrent un changement important dans l'attitude des économistes et des énergéticiens vis-à-vis du futur, en sonnant le glas des méthodes purement *prévisionnistes*, qui, en extrapolant les tendances passées avec les outils de l'économétrie, avaient clairement échoué à préparer les agents économiques à une telle rupture. Il devint alors évident que, face aux incertitudes nombreuses qui caractérisent le futur, même à court terme, il n'était plus satisfaisant de raisonner sur une prédiction unique et qu'il devenait nécessaire d'envisager des scénarios multiples.

La projection de scénarios contrastés s'organise maintenant sur la double base de la formulation d'une *vision qualitative* du futur, à travers des récits cohérents des évolutions démographiques, économiques, sociales et technologiques, et de la *traduction quantitative* de cette vision dans des modèles numériques. Dans le domaine de l'énergie, cette deuxième étape est rapidement devenue indispensable du fait (i) de la complexité des mécanismes à modéliser pour projeter précisément l'offre et la demande d'énergie, (ii) d'un horizon temporel de plus en plus lointain, avec l'émergence des questions de sécurité d'approvisionnement, de sûreté nucléaire et de changement climatique. Le modèle numérique s'impose comme le moyen de calculer les états futurs de systèmes complexes, d'assurer un minimum de cohérence des projections qualitatives, de procéder à des analyses de sensibilité et, *in fine*, de tester l'effet de certaines politiques. Cette démarche a été entérinée collectivement à la fin des année 90, entre le deuxième et le troisième rapport du GIEC, et notamment à l'occasion de l'exercice de projection des SRES (*Special Report on Emission Scenarios*, Nakicenovic et al., 2000).

Le large développement d'outils de simulation des trajectoires de long terme et la croissance exponentielle du nombre de scénarios mondiaux ou régionaux est cependant une évolution à double tranchant : certes, elle traduit des progrès considérables dans les moyens de recherche, d'expertise et d'aide à la décision, mais la complexité des modèles, des hypothèses qu'ils incorporent et des résultats qu'ils produisent, est susceptible de rendre inaudibles ou suspects les enseignements potentiels des travaux numériques. En particulier, la dispersion des trajectoires simulées, telle qu'elle ressort de l'ensemble des travaux publiés, fait ressortir des intervalles d'incertitudes très larges et peu plausibles : comment expliquer que les dynamiques économiques des 50 prochaines années pourraient aussi bien multiplier par 3 les émissions de GES que les stabiliser, sans politiques spécifiques ?

Cette observation génère une grande insatisfaction vis-à-vis de la représentation des incertitudes et place la modélisation dans une situation fragile : soit les modèles ne sont pas encore assez aboutis pour projeter de manière cohérente les états futurs du monde, ce qui débouche logiquement sur une combinatoire trop large, et dans ce cas, il faut renforcer les efforts de cohérence interne des modèles et d'intégration des dires d'experts ; soit les modèles ne sont intrinsèquement pas capables de cette cohérence, et leur intérêt est fortement mis en doute.

L'ambition de ce chapitre est d'analyser l'existant – scénarios et modèles – pour tenter de répondre à cette question de la pertinence de la modélisation. Nous adoptons ici une démarche phénoménologique, qui chemine « à rebours » en partant d'un examen des scénarios disponibles – partie visible du travail d'énoncé des récits et de modélisation – pour remonter ensuite jusqu'aux outils qui les ont générés. La première partie du chapitre se concentre ainsi sur l'examen des scénarios existants pour préciser la question de la représentation de l'incertitude et de la cohérence interne des scénarios. La seconde partie remonte au niveau des modèles, en portant d'abord un regard historique sur le développement des outils, pour en déduire une taxinomie simple des outils en quelques

paradigmes fondateurs, grille de lecture qui permettra de s'y reconnaître dans l'ensemble touffu des scénarios existants. Ce « dégrossissage » permettra d'apporter un regard renouvelé sur l'état des scénarios existants et le niveau de développement des modèles, puis dans le chapitre suivant, d'élaborer un diagnostic précis sur les déficiences de la boîte à outils aujourd'hui disponible.

1 Dans la jungle des scénarios

L'explosion de la demande de scénarios pour la recherche, l'expertise et l'aide à la décision, ainsi que le développement exponentiel des moyens de calcul – ne serait-ce que par la diffusion rapide d'ordinateurs portables suffisamment performants dès le début des années 90 – ont permis le développement de nombreux modèles, conduisant en quelques années à des centaines de simulations. Aujourd'hui, nous disposons d'une capacité d'observation privilégiée sur cette intense activité au cours des 15 dernières années grâce à la base de collecte des scénarios quantitatifs initiée dès 1992 par T. Morita et Y. Matsuoka, du National Institute for Environmental Studies (NIES, Japon), qui permet de gérer l'abondance d'informations et de fournir une large base de travail aux travaux de recensement des travaux scientifiques du GIEC.

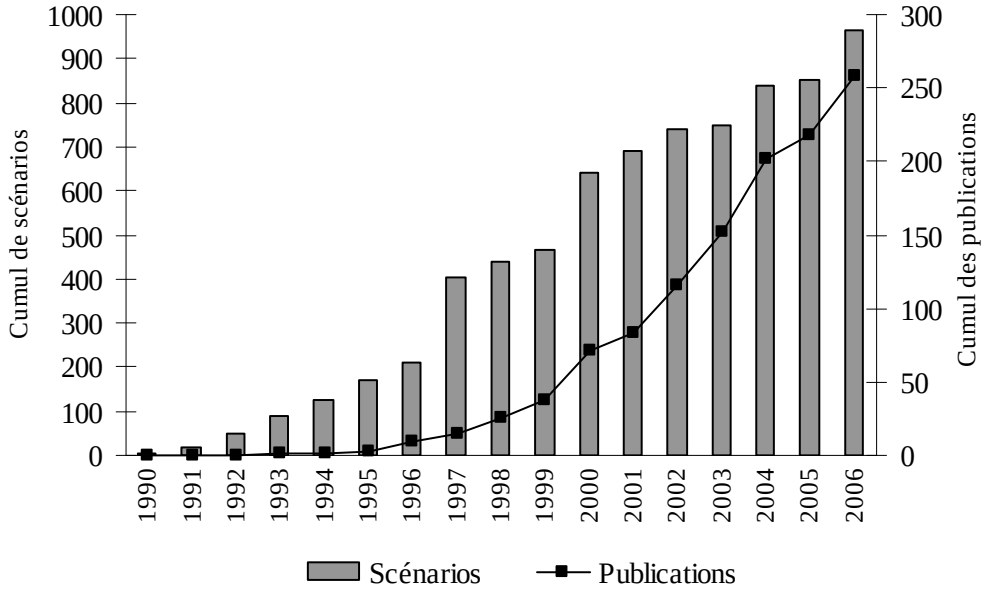


Figure 1 : Scénarios contenues dans la base de données IPCC-NIES et publications associées, par date de création et de parution[2]

Sources : base de données version 3.0 avec mise à jour personnelle à partir des informations publiées dans Hanaoka et al. (2006)

Cette base de données nous permet d'abord de donner une vue d'ensemble des scénarios répertoriés par le GIEC. Parmi ces scénarios, il conviendra ensuite d'apporter une attention spécifique aux scénarios du « SRES » (Special Report on Emission Scenarios, Nakicenovic et al., 2000), élaborés spécifiquement sous l'égide du GIEC.

[2] On retrouve sur la Figure 1 le rôle catalyseur des publications scientifiques du GIEC, puisqu'à l'occasion de chacun des trois rapports cités ci-dessus correspond une accélération de la production de scénarios et, dans une moindre mesure, des publications correspondantes.

1.1 Un panel de trajectoires difficile à exploiter

Cette base de données a connu jusqu'à aujourd'hui trois grandes phases de développement successives, précisément à l'occasion de publications majeures du GIEC :

- En 1998, la première version regroupait 428 scénarios, globaux ou régionaux, en majorité sans politiques climatiques ; l'Energy Modelling Forum (EMF 14) et l'International Energy Workshop (IEW 1995, 1996, 1997) étaient chacun source d'environ un tiers de la base de données. Publiée dans le cadre du Rapport Spécial sur les Scénarios d'Émissions (Nakicenovic et al., 2000), l'analyse de ces scénarios a notamment permis d'étayer l'argument selon lequel les six scénarios SRES « marqueurs » pouvaient être considérés comme représentatifs à la fois des 40 scénarios générés par les 6 équipes mobilisées par le rapport SRES, mais aussi de l'ensemble du faisceau de trajectoires produites par l'ensemble de la communauté scientifique à cette date.

- En 2001, une version actualisée de la base comptait 519 scénarios, les nouveaux scénarios étant essentiellement des scénarios *avec politiques climatiques*, générés à partir des scénarios SRES pris comme trajectoires de référence. La méta-analyse de Rana et Morita (2000) fut incluse dans le tome III 'Mitigation' du Troisième Rapport d'Evaluation (TAR) ; elle portait sur un sous-ensemble restreint de 75 scénarios, en limitant son champ d'investigation aux scénarios de *réduction* des émissions avec une couverture mondiale et un horizon temporel supérieur ou égal à un siècle.

- En 2006, la base en accès public s'est élargie à 725 scénarios, notamment suite à un nouvel effort de recension de données relancé en 2004 afin de préparer le quatrième rapport d'évaluation du GIEC achevé en 2007 (GIEC, 2007). En fait, si l'on y ajoute les résultats des derniers exercices internationaux de modélisation IMCP, EMF19 et EMF21, énumérés dans (Hanaoka et al., 2006), la base de données s'étend à 909 scénarios. Plusieurs analyses déjà publiées tiennent compte de la totalité pour alimenter la synthèse du GIEC avec les données les plus récentes : Nakicenovic et al. (2006) analysent les modifications de distribution statistique entre les scénarios antérieurs au troisième rapport du GIEC (TAR) et ceux générés entre 1999 et 2006 ; Hanaoka et al. (2006) produisent une analyse portant surtout sur l'examen des scénarios de *réduction* des émissions produits depuis le TAR, en précisant leur analyse au niveau régional.

Les méta analyses successives citées ci-dessus sont élaborées selon une approche commune, selon laquelle l'éventail de trajectoires est pris comme indicateur de la diversité des perceptions du futur que la communauté scientifique formule en l'état de ses connaissances (Nakicenovic et al., 2006). Le mode opératoire est le suivant : il s'agit d'analyser les intervalles balayés par les scénarios d'émissions, éventuellement en restreignant l'analyse à une sous partie de la base de données. Au-delà des volumes émissions à proprement parler, les auteurs ont recours à l'identité dite « de Kaya »[3] (équation (1.1)), 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

[3] Identité plus généralement connue, dans la littérature environnementale, sous le sigle IPAT (Commoner, 1972, Ehrlich et Holdren, 1972), 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).

intensité carbone du panier énergétique). Les propriétés statistiques – valeur médiane, distribution – de chacun des « déterminants » ainsi isolés sont ensuite examinées en détail, révélant ainsi une mesure des incertitudes sur le monde futur telles qu'elles ressortent *ex post* de la diversité des exercices de modélisation réalisés jusque là[4].

Il convient de rappeler que les variables de cette identité ne sont jamais indépendantes, sans quoi l'on laisse le champ libre à l'idée fausse que l'on peut générer une combinatoire libre à partir des intervalles d'incertitude de chacune de ces variables. Nous reviendrons sur cet écueil au paragraphe 1.2.

$$Emissions = Population \times \frac{PIB}{Population} \times \frac{Energie}{PIB} \times \frac{Emissions}{Energie} \qquad ((1.1))$$

Il faut aussi rappeler que la densité de distribution des valeurs des variables agrégés dans la base de données ne peut absolument pas être interprétée comme une mesure pertinente de la probabilité d'occurrence de tel ou tel monde futur. Une telle lecture probabiliste serait antinomique avec le principe non-probabiliste des approches exploratoires « par scénarios » qui constituent la majorité des travaux répertoriés dans cette base de données. Plus précisément, un certain nombre de scénarios ont une vocation de *« prédiction raisonnable »* – ils sont conçus pour « réduire l'incertitude » et permettre à tel ou tel groupe de décideurs de se caler sur eux pour prendre leurs décisions – et d'autres ont une vocation *exploratoire* - ils visent délibérément à explorer les futurs « extrêmes » ou bien à conduire des tests numériques sur tel ou tel mécanisme (par ex. le progrès technique induit). A cela se rajoute la non-indépendance des travaux regroupés dans la base de données : par exemple, les scénarios SRES (Nakicenovic et al., 2000) ont été repris comme référence pour de nombreux scénarios de réduction des émissions. Le travail statistique effectué dans les rapports successifs de l'IPCC est dès lors à interpréter avec beaucoup de précaution, comme le soulignent leurs auteurs Nakicenovic et al. (2006) : '*In fact, the scenarios are often not independent of each other and share many common traits.*' (p. 171).

Malgré cette limite forte, la contribution majeure de ces analyses est de révéler le spectre des futurs possibles envisagés au travers d'un ensemble représentatif de la littérature[5] et des principaux ateliers internationaux de modélisation. Plus précisément, cela permet de révéler l'étendue de la combinatoire des paramètres qui se dessinent derrière ces trajectoires futures et de dégager quelques faits stylisés robustes au sein de la base de données. Les revues les plus récentes (Nakicenovic et al., 2006 ; GIEC, 2007, ch. 3) soulignent les légères évolutions de cette combinatoire depuis quelques années :

- Les projections de population ont été revues à la baisse entre les années 90 et aujourd'hui, avec un écrêtement des scénarios les plus élevés : l'hypothèse la plus élevée pour la population mondiale en 2100 est passée de 19 à 15 milliards d'habitants, l'hypothèse la plus basse est passée de 6 à 5 milliards ;

[4] On retrouve ici un des objectifs fondamentaux de la production de scénarios : '*an appropriate tool with which to analyze how driving forces may influence future emission outcomes and to assess the associated uncertainties*' (IPCC, 2000).

[5] Etant donné que la base de données est enrichie sur la base de la bonne volonté des modélisateurs pour y contribuer, elle ne saurait prétendre à l'exhaustivité, même si le travail considérable de l'équipe du NIES permet de tendre aujourd'hui vers une revue systématique des travaux publiés.

- Les projections de PIB mondial en 2100 ont aussi subi une révision globale à la baisse : elles couvraient auparavant un intervalle particulièrement large de 70 à 700 billions de dollars (dollars constants US1990), qui correspond à une multiplication du PIB en un siècle allant de 2.5 à 25 ; la borne haute des scénarios plus récents est rabaissée à 550 billions de dollars.

- La quasi majorité des projections suppose à la fois une baisse de l'intensité énergétique du PIB *et* une décarbonisation du système énergétique. Quelques scénarios sans politiques climatiques incluent une certaine augmentation de l'intensité carbone, mais il est notable qu'ils datent tous d'avant 2001 (scénarios de type SRES A1Fi, dans lesquels la croissance économique est principalement alimentée par un recours aux énergies fossiles).

En sus de cette analyse agrégée, on trouvera aussi des éléments de comparaison au niveau des grandes régions SRES (OCDE, Pays de l'est en transition, Asie, Afrique et Amérique Latine), dans Hanaoka et al. (2006), mais ils ne portent que sur des scénarios de réduction des émissions.

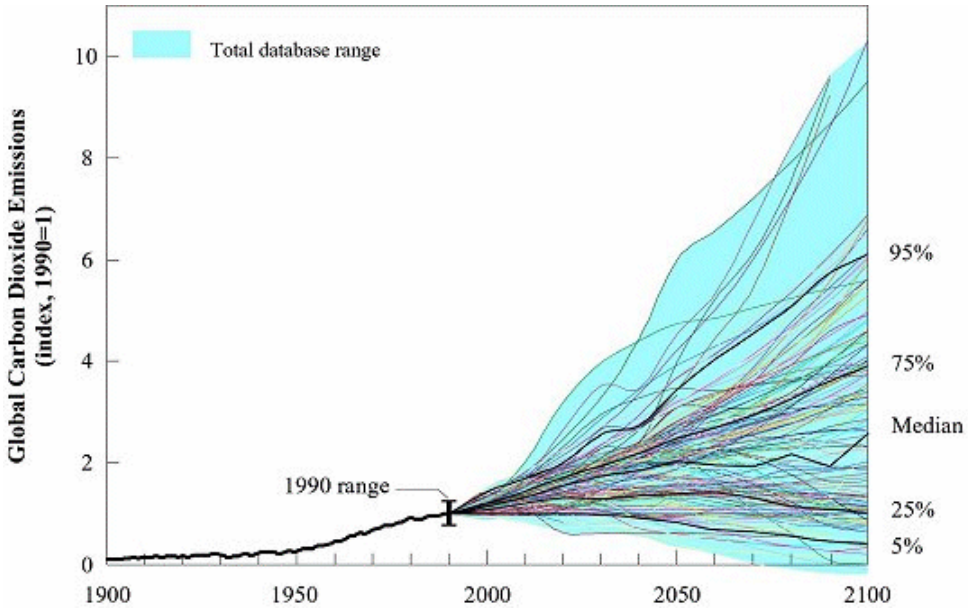


Figure 2 : Projection des émissions mondiales de CO_2 issues des combustibles fossiles et de l'industrie (Nakicenovic et al., 2000)

Finalement, malgré l'importance du travail de nomenclature, de classement et d'exploitation des données réalisé en amont de ces analyses, les enseignements dégagés restent d'une portée très générale et limitée. Ils ne conduisent pas véritablement à une clarification des conditions dans lesquelles il est possible de penser le futur. L'ampleur des fourchettes d'incertitude qui se dégagent de ces graphes « en spaghettis » (cf. Figure 2) est plutôt de nature à jeter le doute sur l'utilité de ces exercices de projection à très long terme, et en particulier sur la nécessité du recours à des outils très perfectionnés si ceux-ci ne permettent pas de restreindre l'incertitude plus que dans un simple calcul de coin de table faisant varier de façon indépendante les diverses composantes de l'identité de Kaya. En l'absence d'un éclaircissement sur les conditions de modélisation qui sous-tendent ces trajectoires, ce matériel abondant est encore loin de fournir, sinon une base robuste de « prédiction du futur », au moins un

outil d'analyse permettant aux décideurs un progrès dans la compréhension du contenu des scénarios et de la nature des défis à relever. Il existe plusieurs autres « bonnes raisons » d'être prudent sur l'interprétation des résultats contenus dans la base de données :

1. Les incertitudes sur le monde futur qui prennent forme dans ce bouquet de scénarios relèvent de deux réalités très différentes. Certes il s'agit en partie d'un problème cognitif irréductible : nous ne pouvons affirmer avec certitude quels seront dans le futur les potentiels technologiques, les déterminants démographiques, la structure de la société et des institutions, le degré de dématérialisation des économies, etc. Mais cette méconnaissance, ainsi que l'intervalle d'incertitude qui résulte de la combinaison des paramètres plausibles, encapsulent aussi **un espace de choix collectifs et individuels très large**, concernant les orientations économiques, politiques, institutionnelles, sociétales. C'est là toute l'ambiguïté du terme « business as usual » : on définit ainsi tous les scénarios ne comprenant aucune politique explicitement dédiée à la lutte contre le changement climatique, mais ils ne correspondent pas pour autant à des trajectoires figées à l'avance, insensibles aux choix socio-économiques pris en tout point du temps, dans lesquelles la démographie, le progrès technique, et l'évolution des besoins énergétiques seraient des fatalités incertaines[6].

2. Les scénarios regroupés dans la base de données relèvent en fait d'**objectifs de recherche précis et très variés**, **à un moment donné** ; ceci rend fragile toute comparaison croisée des scénarios à la fois dans le temps et parmi les différentes équipes. Par exemple, les chantiers successifs de l'Energy Modeling Forum, ou le récent exercice IMCP – Innovation Comparison Modeling Project – sont sources de plusieurs « paquets » importants de scénarios, et ils portent chacun sur une problématique précise[7], qui conditionne le choix d'un ou plusieurs scénario(s) de référence, des hypothèses utilisées et finalement du jeu de scénarios créés. A part les scénarios IS92 et SRES, aucun exercice ne visait explicitement à explorer les intervalles d'incertitude en 2100. Il est donc très difficile de discerner les causes réelles d'une évolution de la répartition statistique des scénarios : véritables changements de la vision des bornes d'incertitude, progrès scientifique, utilisation de scénarios médians, affichage politique ? C'est la raison pour laquelle, en conclusion de leur analyse récente, Nakicenovic et al. (2006) soulignaient l'intérêt et l'actualité d'exercices de modélisation internationaux ciblés spécifiquement sur l'exploration de l'incertitude (type SRES), ce qui permettrait d'aborder cette question de manière spécifique et plus cohérente.

3. Les scénarios sont générés par **des modèles de natures très variées**, dont les capacités à simuler des trajectoires de long terme *cohérentes* sont inégales. L'hétérogénéité des modèles se traduit dans leur structure, leur niveau d'agrégation, le périmètre des mécanismes et des variables qu'ils représentent ou encore leur paramétrage. Sur ce dernier point, en particulier, la base de données fait ressortir un symptôme clair de l'hétérogénéité des modèles utilisés : les valeurs prises par les grandes variables agrégés – PIB et énergie primaire notamment – pour

[6] Certains débats récents au sein de la communauté scientifique soulignent une certaine remise en question de la plausibilité de scénarios étiquetés « BAU » (SRES B1 par exemple) dont les émissions de GES déclineraient suffisamment et assez tôt pour permettre une stabilisation des concentrations en deçà de 750 ppm CO_2 équivalent.

[7] Par exemple, EMF 21 portait sur les simulations multi-gas, EMF 22 sur les scénarios de stabilisation, avec un point particulier sur la modélisation des émissions en provenance des changements d'usage des sols.

l'année 2000 sont très variables, à cause de différences de définitions, de périmètres de mesure ou d'année de calibrage. Le PIB mondial varie du simple au double, entre 20 et 40 milliers de milliards de dollars (selon le FMI, le PIB était de 31400 milliards en taux de change courants, 44 550 milliards en parité de pouvoirs d'achat (World Economic Outlook, 2001), et la production d'énergie primaire simulée prend des valeurs comprises entre 315 et 586 exajoules (EJ) alors que la production calculée par l'Agence Internationale de l'Energie a été de 421 EJ en 2000. Si les modélisateurs corrigeaient tous leur paramétrage pour rétablir ex post l'exactitude du point de passage en 2000, cela *pourrait* modifier les intervalles d'incertitude apparents en 2100.

4. **Le niveau d'agrégation des variables analysées reste très frustre** sur la description du monde futur ; en général celle-ci se cantonne à une décomposition « à la Kaya » des émissions en grandes composantes. L'analyse des *déterminants* tangibles des émissions, tels que l'évolution des techniques, des infrastructures, des styles de développement, du contenu matériel de la croissance, en un mot du « contenu matériel du monde futur », reste absente de ces analyses car elle exigerait d'approfondir la description des scénarios.

Ces observations soulignent combien le large spectre de trajectoires futures plausibles dont nous disposons à ce jour est davantage à prendre comme **un témoin quantitatif** de l'intense activité de modélisation qui sous-tend les recherches sur les politiques énergétiques et climatiques, que comme un moyen d'appréhender directement l'état de l'art de la modélisation.

1.2 Les SRES : retour sur un essai à perfectionner

Les difficultés à exploiter une telle juxtaposition de scénarios expliquent en partie le rôle de référence pérenne que conservent les scénarios élaborés dans le cadre du rapport SRES (GIEC, 2000), tant pour nourrir les simulations des modèles climatiques que pour servir de base au calcul de scénarios de réduction des émissions. Cette position de référence s'explique bien sûr par la légitimité du GIEC à coordonner et valider les travaux scientifiques nécessaires à la production de ces scénarios ; elle s'explique aussi par le fait que les scénarios SRES représentent un éventail très large de trajectoires d'émissions, censé illustrer explicitement l'incertitude sur le monde futur, et qu'ils sont définis plus clairement que tous les autres scénarios produits de par le monde.

Plus précisément, le processus de production des scénarios SRES visait à 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 permet au passage de redire qu'à l'horizon de plusieurs décennies, il est illusoire de définir « le » scénario de référence le plus probable par une extrapolation des tendances passées. Au contraire, 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 de 40 scénarios ainsi

générés[8], six scénarios *marqueurs* furent retenus par souci de clarté et d'économie de résultats. Finalement, l'atout principal de ce jeu de scénarios était de s'appuyer sur une démarche qui se voulait cohérente, clairement destinée à traduire des visions contrastées et explicites du monde futur et à capter ainsi l'ampleur des incertitudes actuelles.

Malgré la rigueur et le déroulement remarquable de cette entreprise, les résultats fournis ont suscité 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 (GtC) de carbone (à comparer aux émissions de 1990 de 6,0 GtC) : est-ce pensable que l'univers des possibles soit, au niveau des tendances agrégées, aussi large que celui 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 par les barres d'incertitude de la Figure 3, pose question sur la pertinence 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. Si les modèles, censés restreindre l'espace des possibles en garantissant la cohérence des trajectoires macroéconomiques et de leur contenu technique, ne fournissent, in fine, qu'un « plat de spaghettis » comme celui de la Figure 3, leur utilité peut raisonnablement être mise en doute.

[8] Pour certains scénarios, certaines 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).

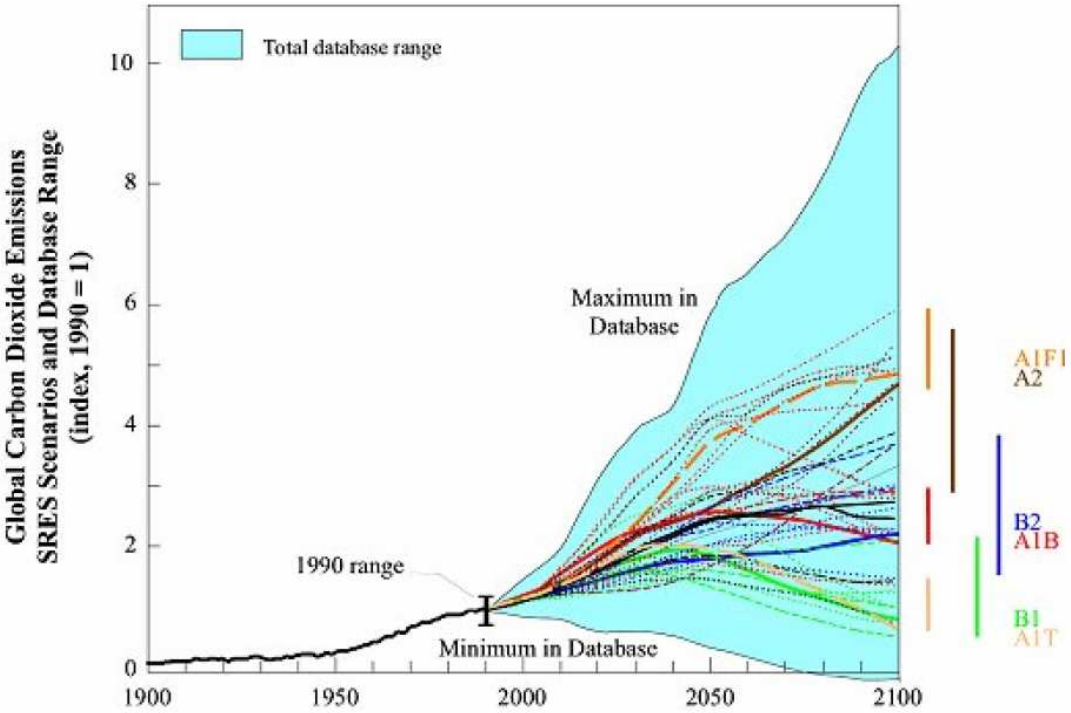


Figure 3 : Émissions de CO_2 des scénarios « SRES »
(indice 1=1990)

Cette explosion de l'incertitude, même au sein d'un exercice coordonné comme celui des SRES, peut s'expliquer par des difficultés de mise en cohérence à deux niveaux, difficultés bien connues des auteurs du rapport (Nakicenovic, 2000, encadré 1-1 p. 63) :

- ***Une cohérence « apparente » entre les composants 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 réalité, dans un tel exercice de collaboration entre équipes de modélisation, on distingue deux types de paramètres : d'un côté, 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 de l'autre côté, ceux sur lesquels, pour des raisons de faisabilité, chaque équipe de modélisation garde de toute façon une maîtrise indépendante, tout en essayant de respecter fidèlement les récits qualitatifs.

Qu'en est-il dans le cadre de l'exercice SRES ? Une harmonisation partielle des trajectoires de PIB, de population et d'énergie finale a été réalisée, mais, faut 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 (1.1) 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. Inversement, une faible harmonisation des composants de l'identité de Kaya laisse des marges de manœuvre considérables. Il suffit de réaliser quelques calculs simples pour s'en convaincre : nous avons combiné dans le Tableau 1 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 apparemment faibles sur les hypothèses de taux de croissance : 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, 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 1 : Budget carbone 2000-2100 à partir de différents paramétrages de l'identité de Kaya

Cet écueil peut sembler assez simple à corriger, en allant au bout de l'harmonisation des modèles. Mais dès lors que cette harmonisation aurait lieu, et que les modèles seraient contraints de respecter des projections exogènes pour 3 des 4 composants de l'identité de Kaya, les modèles eux-mêmes deviendraient presque inutiles et une simple projection « de coin de table » pourrait avantageusement les remplacer. La cohérence affichée devient alors une véritable *illusion d'optique* : les modèles ne servent plus à garantir la cohérence interne des trajectoires et la plausibilité des combinaisons d'hypothèses exogènes qu'on les force à respecter, alors qu'un de leurs objectifs principaux est précisément d'invalider certains assemblages improbables. Les scénarios réalisés se limitent alors à une juxtaposition d'hypothèses numériques traduisant tel ou tel élément des divers *récits* sans validation de la plausibilité de ces récits en aval.

- ***Une cohérence « endogène » entre les véritables déterminants des émissions***

Cette harmonisation « par le haut », qui consiste 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. En effet un grand nombre de combinaisons est susceptible de survivre à ce test *a priori*, comme nous l'avons illustré dans le Tableau 1. Pour éviter ce piège combinatoire, il conviendrait de 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, les modélisateurs sont parfaitement conscients que les dynamiques représentées dans l'identité de Kaya ne sont pas indépendantes : l'examen des interdépendances faisait explicitement partie du cahier des charges de l'IPCC pour l'exercice SRES afin d'améliorer la méthodologie utilisée pour les précédents scénarios IS92, et le chapitre 3 du rapport SRES contient par ailleurs 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 *limitées* 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 2. Le tableau doit être lu en ligne : la première ligne décrit les effets des dynamiques démographiques sur les autres termes de l'identité de Kaya, la deuxième décrit l'influence de la croissance économique, et ainsi de suite…

Certaines des causalités citées en exemple 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 panier technologique et efficacité globale (2) – tandis que d'autres restent mal intégrées dans les projections de long terme – comme c'est le cas du lien 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 2 : Liens d'interdépendance entre les termes de l'identité de Kaya

Les six modèles[9] utilisés pour générer les scénarios SRES permettent une prise en compte plus ou moins large de ces interrelations. Ils ont en commun une description détaillée du système énergétique, une description agrégée du reste de l'économie et un couplage intégré avec des modules climatiques. Ils se distinguent les uns des autres principalement par leur mode de résolution (optimisation intertemporelle de la consommation agrégée, optimisation linéaire du système énergétique avec module macroéconomique ou système dynamique en équilibre partiel des marchés énergétiques), leur description des changements d'usage des sols, ou encore leur module climatique. Ce ne sont pas tant les détails de leur structure qui nous intéressent ici que le périmètre qu'ils recouvrent dans le Tableau 2. En réalité les six modèles couvrent, avec plus ou moins de détail 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

[9] AIM, ASF, IMAGE, MARIA, MESSAGE, MiniCAM (Nakicenovic, 2000, Annexe IV)

d'industrialisation ou de tertiarisation. Quant aux modules macroéconomiques (fonction de production agrégée, simple élasticité du PIB aux prix de l'énergie), ils sont trop agrégés pour permettre une représentation approfondie des rétroactions du système énergétique sur le reste de l'économie, telles que l'effet des déséquilibres liés aux 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. Lorsque, par construction ou par manque de connaissances scientifiques, les modèles ne permettent pas certaines mises en cohérence, leur mise en place est alors reportée en amont dans la formulation de la description qualitative des scénarios.

L'histoire récente des débats scientifiques ou politiques autour des SRES fournit deux exemples de l'importance de cette cohérence interne, qu'elle soit endogène aux modèles ou intégrée dans les récits « faute de mieux ».

Le premier exemple se rapporte à l'interprétation erronée des scénarios SRES par Lomborg (2001). Les récits qualitatifs formulés pour la production des scénarios SRES ont abouti à la combinaison d'un style de vie plus « sobre » avec une croissance moins forte du PIB, avec des hypothèses similaires sur la globalisation de l'économie mondiale (scénario A1 – forte croissance, intensité carbone élevée – et B1 – croissance plus modérée et moins carbonée) ; Lomborg (2001) ne manqua pas de le noter pour en déduire une mesure des « coûts » de protection de l'environnement (Hourcade et Journé, 2003) et conclure qu'une société écologique était décidément très coûteuse. Au-delà du manque de rigueur de l'argument de Lomborg, il y a ici un problème de robustesse et d'explicitation des corrélations *a priori* dans les récits en amont des scénarios.

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 scénarios SRES, du fait que le rattrapage des niveaux de productivité avait été exprimé en taux de change courants (MER) plutôt qu'en parités de pouvoir d'achat (PPA). L'argument central est que cette erreur d'unité conduit à surestimer l'écart de productivité entre les PED et les pays industrialisés et donc à surestimer la croissance future de la productivité des PED dans leur phase de convergence. Castles et Henderson en concluaient une surestimation certaine des émissions mécaniquement liées à une croissance réelle jugée déraisonnable pour les PED. Dans leur réponse, les auteurs du rapport SRES (Grübler et al., 2004) acceptent partiellement la critique en reconnaissant que seules les mesures en PPA sont pertinentes pour les considérations de rattrapage de productivité au niveau international. Dans le même temps, ils soulignent qu'on ne peut conclure que les émissions aient été surévaluées, parce que tout surplus de croissance peut aller de pair avec un incrément de progrès technique et de gains d'efficacité énergétique, susceptibles d'annuler ou d'amoindrir l'effet de la croissance supplémentaire. En fait, seul un modèle désagrégé et intégrant des gains d'efficacité endogènes permet de tester cette affirmation numériquement. McKibbin et al. (2007) procèdent à cette vérification avec le modèle *G-Cubed* ; ils concluent que l'erreur de « mesure » du rattrapage de productivité potentiel par les PED a un effet *incertain* sur les émissions, qui dépend du contenu structurel de leur croissance, de l'affectation des investissements et de la direction du progrès technique.

Ces deux exemples soulignent l'impératif de renforcement de la cohérence des scénarios qui nous préoccupe. L'enjeu scientifique est double : d'une part, progresser dans l'observation et la

compréhension des interrelations entre les *déterminants fondamentaux* des émissions[10] ; d'autre part, recourir à des modèles les plus « complets » possibles en termes de périmètre et de représentation de ces interrelations. Certes, les modélisateurs ont considérablement progressé sur ce deuxième axe de recherche, notamment avec les nombreux développements de modèles hybrides : il est remarquable que les dernières recommandations du Groupe de Travail sur les Nouveaux Scénarios d'Émissions (WGNES, 2005) insistent sur cet impératif de renforcement de cohérence au sein des scénarios et entre les modèles utilisés.

En résumé, il apparaît clairement que l'analyse des scénarios SRES, ou de la base de scénarios du GIEC dans son ensemble, se heurte à des intervalles d'incertitudes très larges difficilement compréhensibles de l'extérieur. La compréhension du contenu des projections requiert en fait une « intuition » précise des éléments structurels, fonctionnels ou paramétriques des modèles qui sont les plus sensibles. Il nous faut donc approfondir notre analyse de la base de scénarios plus en amont, en revenant sur le contenu de la boîte à outils et la nature des modèles utilisés : c'est à ce niveau là que nous dégagerons une vision précise sur l'état de l'art.

2 Des scénarios aux modèles

Pour tenter de décrypter le paysage des modèles et de comprendre les pratiques de modélisation actuelles, nous ne pouvons faire l'économie d'un suivi de la chronologie du développement de la boîte à outils depuis les années 70. Un tel suivi fait rapidement apparaître la possibilité de resituer les modèles actuels par rapport aux principales « filiations » temporelles dont ils sont issus. Le paysage actuel de la modélisation de long terme peut alors être lu comme *héritage* des trois dernières décennies de recherche et d'expertise sur les dossiers « énergie » puis « climat ». Nous nous proposons ici de retracer succinctement les développements des approches de modélisation sur le long terme, en précisant, au fur et à mesure, la nature des outils utilisés et les progrès qu'ils ont représentés.

2.1 Un regard historique sur le développement de la « boîte à outils »

Nous l'avons évoqué en introduction de ce chapitre, le début des années 70 est marqué par le passage de la question de l'énergie au premier plan de la scène politique et scientifique, avec deux évènements majeurs :

- en 1972, le rapport du club de Rome «*Limits to Growth* » lance une alarme sur la finitude des ressources naturelles et environnementales, ce qui marque le début d'une vague importante de débats sur la durabilité de la croissance économique ;
- en 1973, le premier choc pétrolier fait apparaître dans l'actualité de court-terme le problème tangible de la sécurité du système énergétique, point névralgique au cœur de nos économies modernes.

Les questions soulevées concernant la finitude des ressources ou la vulnérabilité énergétique ne sont pas inédites, puisqu'elles font déjà l'objet de nombreuses études et publications (notamment celles de la Fondation Ford, initiées peu avant le début du premier choc pétrolier), mais le contexte nouveau du début des années 70 met l'ensemble des décideurs et des experts de l'énergie face à deux

[10] Nous reprendrons ce terme dans le chapitre 2 pour discuter le « bon » niveau de désagrégation des mécanismes déterminant le changement structurel, qui lui-même sous-tend l'évolution des émissions à long-terme.

problématiques peu explorées jusque là : **l'incertitude** et **le long terme**. Premièrement, le choc pétrolier vient rappeler avec force que trop d'éléments de contexte politique et de décisions multiples interviennent dans l'évolution du monde futur pour que la prévision économétrique soit fiable, même à court-terme. Deuxièmement, trois questionnements transversaux obligent à penser la planification énergétique sur des horizons temporels de plus en plus lointains : la sécurité d'approvisionnement énergétique, les risques liés à l'énergie nucléaire, et le changement climatique liés aux émissions de gaz à effet de serre. La modélisation énergétique va alors connaître une rupture avec l'approche « prévisionniste », en généralisant un positionnement de *prospective* fondé sur la production de scénarios multiples. Ensuite, les évolutions de la modélisation énergétique des années 70 constitueront la base méthodologique pour le traitement de la question des émissions de CO_2.

2.1.1 A la recherche d'une alternative aux approches prévisionnistes en échec

Entre 1970 et 1990, les recherches sur le dossier climatique se développent selon trois démarches complémentaires (Baron et Salles, 1991) :

(i) des approches *exploratoires* visant à identifier les risques,

(ii) des approches *normatives* proposant des visions alternatives du futur et démontrant la possibilité de minimiser ces risques,

(iii) la recherche de *stratégies optimales* pour gérer le problème climatique à long terme.

Des approches exploratoires du style « et si... »

Logiquement, les premières recherches s'organisent autour de la nécessité d'explorer l'espace des futurs possibles pour mettre en évidence les enjeux et quantifier l'ampleur des risques.

Les premiers essais sont de simples projections de « coin de table », fondées sur l'extrapolation des taux de croissance des émissions et sur l'estimation de la quantité de carbone contenue dans les réserves fossiles et susceptible d'être relarguée dans l'atmosphère tôt ou tard (Keeling et Bacastow, 1977 ; Siegenthaler et Oeschger, 1978 ; MacDonald et al., 1979 ; Hansen et al. 1981). Ces projections ne prennent en compte aucun élément économique ou technologique, elles se contentent d'un bilan massique sur le carbone enfoui et potentiellement libéré, avec ou sans contrainte de rythme d'exploitation. Elles permettent simplement de générer une série de scénarios d'émissions présentant un degré minimal de « plausibilité » pour tester les modèles climatiques.

Conjointement, le recours à des approches modélisées se développe et se généralise rapidement. A ce stade, l'objectif de la modélisation est de fournir des scénarios exploratoires cohérents et plausibles, pour comprendre comment tel ou tel jeu d'hypothèses sur le futur se traduit en termes de trajectoires d'émissions. A cet effet, ce sont des outils préexistants qui sont mobilisés, préfigurant les deux grandes familles de modélisation classiquement désignées « top-down » et « bottom-up ».

La première voie est celle que suit **W. Nordhaus** (1977a, 1980) : il fonde ses analyses successives sur **des modèles compacts**, qui représentent une économie globale à un seul bien, dont la production requiert de l'énergie primaire, composées de sources d'énergies d'origine fossile et non-fossile, le recours aux premières induisant des émissions de CO_2. Dans ces modèles, le prix de l'énergie fossile est lié à l'épuisement des ressources, le prix de l'énergie non fossile varie en fonction d'un progrès technique autonome, tandis que le moteur de la croissance, fondé sur les dynamiques de population et de productivité du travail, suit une trajectoire exogène. Les scénarios ainsi générés reposent sur des hypothèses économiques explicites et jugées plausibles ; elles restreignent les

possibles par rapport aux pures extrapolations physiques évoquées plus haut. La compacité de ce type de modèle permet à Nordhaus de développer une **approche probabiliste** de la génération de scénarios exploratoires (Nordhaus et Yohe, 1983), en partant de distributions *a priori* sur les paramètres incertains du modèle. Cette approche aura peu d'échos par la suite, surtout parce qu'elle est difficile voire impossible à étendre à des modèles plus complexes, dont le nombre de paramètres augmente très rapidement[11]. Cependant, la notion de scénarios probabilistes revient aujourd'hui dans les discussions autour des nouveaux scénarios (GIEC, WGNES, 2006), notamment en raison de l'embarras des décideurs face à des fourchettes d'incertitude aussi larges que celles des SRES et non probabilisées.

La seconde voie est celle des « **modèles d'ingénieurs** » du système énergétique. Ces outils reposent sur une représentation précise du système de production et de transformation de l'énergie, avec des hypothèses exogènes sur la disponibilité des ressources naturelles, la croissance et la demande finale de services énergétiques. On distingue des variantes sur l'architecture des modèles, leur degré de précision et leurs limites :

- Lancé en 1973, le programme de modélisation de l'IIASA débouche sur la publication en 1981 du rapport « Energy in a Finite World » (Häfele, 1981). L'architecture de modélisation est très détaillée pour la partie énergétique, il repose essentiellement sur le bouclage des modèles de simulation MESSAGE et MEDEE, le premier représentant l'offre et la conversion d'énergie et le second la demande de services finaux. L'architecture complète comprend aussi le modèle IMPACT qui permet de calculer le lien entre les dynamiques énergétiques et la croissance, et le modèle MACRO qui représente le partage entre consommation et investissement. La conception de l'ensemble est censée assurer un bouclage macroéconomique complet, bien qu'en réalité ce bouclage n'ait pas été effectif dans le rapport publié en 1981, comme cela a été mis en évidence par Hourcade (1984).

- Quelques années avant ce rapport, Nordhaus (1977b, 1979) avait déjà publié des simulations effectuées à partir d'un modèle d'optimisation linéaire du système énergétique, dans la filiation directe des développements importants d'après-guerre autour de l'analyse d'activités (Koopmans, 1951 ; Manne et Markowitz, 1961). Le principe de ce type de modèle est de minimiser le coût de fourniture des services énergétiques liés à un scénario de croissance exogène, sous contraintes des technologies, des stocks de ressources naturelles, des prix de production et de l'élasticité-prix de la demande de services énergétiques. Une des premières architectures de ce type consacrée au système énergétique dans son ensemble a été développée sous l'impulsion du *Department of Energy* américain, avec le modèle BESOM – « Brookhaven Energy System Optimization Model » (Hoffman, 1973) couplé ensuite au modèle économétrique de demande finale de Jorgenson (Bernanke et Jorgenson, 1975). Nordhaus et Ausubel (1983) ont cependant souligné la grande sensibilité des simulations aux hypothèses exogènes de croissance et de prix futurs, pointant là un défaut intrinsèque à ce type de modèles.

- Edmonds et Reilly (1983a,b) proposent une structure de modélisation proche de l'architecture de l'IIASA dans son principe, mais conçue pour corriger l'écueil de la trop

[11] Les études les plus proches de cette approche sont en fait les rares analyses de sensibilité effectuées sur les modèles, telles que celle de Reilly et al. (1987) sur le modèle ORAU de l'AIE.

grande complexité souvent reprochée à cette dernière. De fait, le modèle d'Edmonds et Reilly repose sur des relations explicites et en nombre restreint et il est publié avec un effort de transparence remarquable en termes de documentation (Edmonds et Reilly, 1982, Edmonds et Reilly, 1983, Edmonds, 1983). Le système énergétique est simulé en équilibre partiel, sous contrainte d'un ensemble de déterminants macroéconomiques exogènes, avec une demande énergétique élastique aux prix des énergies. Le bouclage macroéconomique, annoncé mais inachevé dans les travaux de l'IIASA cités ci-dessus, apparaît cette fois réalisé avec succès, bien que très modeste dans ses prétentions – une simple élasticité du PIB aux prix de l'énergie. Ce modèle restera une référence pendant une dizaine d'année, largement exploité et amélioré par l'Agence Internationale de l'Énergie et le World Resources Institute (Mintzer, 1987).

Des utopies normatives pour identifier les alternatives possibles

Parallèlement à ces approches positives qui visent à évaluer les futurs possibles et les risques associés, certains auteurs prennent le parti de projections à caractère explicitement normatif pour montrer les possibilités de trajectoires alternatives minimisant ces risques.

Dès 1977, Amory Lovins amorce la réflexion sur les 'soft energy paths', trajectoires de découplage fort entre la croissance économique et les besoins en énergie primaire d'une part, et entre les besoins en énergie primaire et le recours aux énergies fossiles d'autre part. A. Lovins critique ouvertement les travaux de l'IIASA (Lovins et al., 1982) : en particulier, il argumente que la complexité de l'approche modélisée masque des *a priori* déterminants sur les besoins futurs d'énergie, surtout sur la croissance de la demande finale, lesquels *a priori* donnent aux projections un statut quasi normatif. Pour étayer son discours, il propose des scénarios alternatifs (Lovins, 1977, Lovins et al., 1981) fondés sur une frugalité énergétique extrême et une très large pénétration des énergies renouvelables. Son approche n'est pas véritablement modélisée, elle repose sur un calcul de comptabilité énergétique et des jeux d'hypothèses technologiques[12] qui génèrent un découplage important entre croissance et demande d'énergie. Ces estimations furent critiquées à divers titres, soit parce que les hypothèses traduisaient une vision du monde jugée extrême et peu plausible (Hafele, 1981), soit pour des incohérences économiques, par exemple au sujet des besoins de financement des PED (Hourcade, 1984).

Ce positionnement fut le point de départ de nombreux travaux visant à explorer des scénarios alternatifs de frugalité énergétique ou d'abandon des énergies fossiles. La publication, quelques années plus tard, de 'Energy for a Sustainable World' (Goldemberg et al., 1988) s'inscrit directement dans cette tradition, mais en prenant cette fois appui sur le cadre quantitatif d'un modèle technico-économique. Concrètement, ces auteurs élaborent des jeux d'hypothèses de gains d'efficacité à tous les échelons du système énergétique ainsi que des hypothèses de cadrage macroéconomique, pour projeter un bilan énergétique comptable en 2020. Cette méthode permet d'examiner l'effet résultant de bifurcations importantes dans les choix d'équipements énergétiques futurs à tous les échelons. Sur le plan de la modélisation proprement dite, l'approche ne présente pas d'innovation significative, si ce n'est l'inclusion de l'énergie traditionnelle de la biomasse non-commerciale, négligée dans bon nombre de simulations. En filigrane, ces travaux ont le mérite d'alimenter la réflexion sur le rôle respectif des hypothèses exogènes et du modèle dans les projections : ces auteurs reconnaissent la nature *normative* de leur travail, tout en soulignant que les autres travaux de projection tels que ceux

[12] Pour être plus convaincant et ne pas être taxé « d'utopiste technologue », A. Lovins raisonne même à « technologies connues » pour réaliser son scénario volontariste.

de l'IIASA par exemple ne sont pas exempts de prescription normative sur la façon dont « le monde devrait fonctionner »[13], à travers les hypothèses macroéconomiques et technologiques qu'ils adoptent. Leur scénario volontariste leur permet de mieux cerner l'espace d'incertitude autour du monde énergétique futur ; surtout, ces travaux mettent en exergue le fait que cette incertitude relève autant de *choix collectifs* encore à faire que d'inconnus technologiques ou macroéconomiques.

Une approche différente des deux précédentes, et qui illustre le flou de cette frontière entre « normatif » et « exploratoire » dans les projections de long terme, est celle de Frisch et al. (1989) dans « Horizons Énergétiques Mondiaux », étude menée pour le Conseil Mondial de l'Energie. Ce rapport contient deux scénarios énergétiques à 2020, réalisés uniquement à partir de consultations itératives d'experts sur leur vision du futur énergétique mondial. Ici, la subjectivité des projections ne fait aucun doute, et les scénarios obtenus ont une nature hybride : d'une part, ils restent *exploratoires*, et répondent bien à une question du style « et si notre mode de croissance économique et son contenu énergétique se poursuivent sans rupture, alors… », d'autre part, ils traduisent des probabilités subjectives sur un futur « tendanciel ». Deux aspects sont intéressants dans cette approche :

(i) l'intégration d'avis d'experts et de décideurs dans la prospective puis la validation des futurs projetés par ces mêmes experts, à la fois source de crédibilité et moyen de diffusion des études de prospective ;

(ii) le rôle de « prophétie auto-négatrice » que ces scénarios sont censés jouer : mettant en évidence les frictions qui pourraient provenir d'un futur énergétique construit autour des mêmes tendances, ces scénarios peuvent convaincre de la nécessité de bifurquer vers d'autres trajectoires.

La recherche de stratégies optimales

Au-delà du grand écart entre scénarios tendanciels risqués et scénarios volontaristes extrêmes, le troisième temps logique est celui de la définition des politiques climatiques et/ou énergétiques adaptées, voire *optimales*[14]. Nordhaus (1977a, 1979) est le premier à esquisser des simulations en analyse coûts-efficacité pour différents niveaux de stabilisation des concentrations en CO_2, avant d'étendre son analyse à une analyse coûts-bénéfices globale (1980, 1992). Ses premiers travaux préfigurent le succès ultérieur des modèles DICE[15] (Nordhaus, 1993) et RICE, qui gardent une position de modèles de référence sur la question du tempo optimal. La longue « descendance » de cette approche s'explique d'une part par la nature du modèle, qui a l'avantage d'être compact, transparent et reproductible, d'autre part par la rigueur avec laquelle Nordhaus présente et utilise son outil, notamment en effectuant des tests systématiques d'analyse de sensibilité à chaque fois qu'il le juge nécessaire. Cependant, du fait de sa compacité et des hypothèses simplificatrices sur lesquels il est construit, la portée de ce modèle est principalement heuristique. Il ne contient qu'une description frustre du changement technique et il présente le grave défaut de négliger l'inertie des efforts de réduction (Gilotte, 2004).

[13] Goldemberg et al., 1988, p. 3, cité dans Baron et Salles, 1991, p. 65.
[14] Cf. Ausubel et Nordhaus (1983) pour un bilan des premières études de trajectoires de stabilisation.
[15] Acronyme de *Dynamic Integrated Climate Economy*.

2.1.2 La question des coûts : un déclencheur de la mobilisation de l'équilibre général

Dans les travaux que nous avons évoqués jusqu'ici, on peut distinguer deux grandes catégories d'outils : d'un côté, les modèles technico-économiques, fondés sur une description physique et technologique détaillée du système énergétique et soumis à des hypothèses de cadrage macroéconomique, de l'autre côté, les modèles macroéconomiques plus compacts, permettant de soumettre le problème climatique à une analyse coûts-bénéfices globale. A la fin des années 80, les termes du problème de long terme posé par les émissions du CO_2 sont énoncés clairement et le dossier prend de l'ampleur sur la scène politique internationale. La question des actions à entreprendre devient prioritaire : l'enjeu principal devient la définition des modalités et du tempo des politiques à mettre en œuvre et l'évaluation de leur coût potentiel. En fait, ce déplacement des préoccupations vers les coûts de l'action va offrir une opportunité de « revanche » de la communauté des modélisateurs « top-down » par rapport à celle des ingénieurs, qui avait largement dominé la scène depuis le quasi-abandon des modèles économétriques dans les années 70 (Hourcade et Kalaydjian, 1987).

Manne et Richels (1990) sont les premiers à examiner spécifiquement cette question des coûts d'une réduction des émissions. A cet effet, ils utilisent l'architecture Global 2100, constituée de deux modules ETA et MACRO : ETA est un modèle technologique du système énergétique, prenant en compte le renchérissement des ressources fossiles et la pénétration de technologies non carbonées « *backstop* » au-delà d'un certain niveau de prix des énergies fossiles ; MACRO est un modèle macroéconomique agrégé proche de celui de Nordhaus (1980), avec une unique fonction de production et un équilibre global emploi-ressources. En incluant différents niveaux de taxes linéaires sur les énergies fossiles, Manne et Richels évaluent les pertes de PIB correspondant en 2020 à un objectif de -20% par rapport à 1990 pour les pays industrialisés et un doublement des émissions pour le reste du monde. Les auteurs reconnaissent le caractère très limité de cette évaluation, étant donné que tous les mécanismes macroéconomiques déterminants pour le coût net des politiques – commerce international, mode de recyclage des recettes d'une taxe, interactions sectorielles, etc. – sont absents du modèle ; il s'agit en fait du modèle d'équilibre général le plus sommaire possible, qui ne fait que traduire une élasticité non nulle de la demande d'énergie.

C'est pour tenter de répondre aux insatisfactions qui restent entières sur les mécanismes de propagation des coûts liés à une politique climatique que les **modèles d'équilibre général** vont être mobilisés et adaptés au champ des politiques climatiques, dès 1990, avec quelques variantes méthodologiques :

- Jorgensen et Wilcoxen (1990) utilisent le modèle DGEM, qui a la double particularité d'inclure des fonctions de production indirectes estimées économétriquement (translog) et de représenter le progrès technique endogène.
- Perroni et Rutherford (1991) élaborent le modèle CRTM (Carbon Rights Trade Model), modèle statique visant à simuler, à partir des résultats de Manne et Richels, un marché de quotas échangeables, en tenant compte des variations des prix des commodités énergétiques, de l'équilibre des positions extérieures des régions et d'éventuelles localisations industrielles. Ici, c'est donc le développement de l'analyse des interactions sur les marchés internationaux qui fait l'objet d'un effort particulier, les interactions intersectorielles au sein des régions n'étant pas représentées.
- Whalley et Wigle (1991), chercheurs spécialisés dans les modèles d'équilibre général, apportent leur compétence dans le domaine de l'énergie et du climat pour rationaliser le débat sur les

modalités et les effets d'éventuelles taxes sur les émissions de CO_2 : assiette des taxes, différenciation des signaux selon les régions ou les secteurs, recyclage fiscal. Leur modèle est un modèle d'équilibre général multi régions et multi secteurs, qui calcule un point d'équilibre de projection statique à un horizon donné, 2005, 2030 ou 2100. Il permet donc d'analyser l'impact d'une taxe appliquée à la marge d'un équilibre de référence pour un horizon donné.

- Burniaux et al. (1991) développent le modèle GREEN au sein de l'OCDE. Fondé sur la maquette du modèle WALRAS préexistant à l'OCDE et destiné à étudier l'impact des mesures concernant le commerce international, il est enrichi de développements importants sur la partie énergétique, grâce à la collaboration de l'Agence Internationale de l'Energie. Il s'agit d'un modèle dynamique récursif, incluant 8 régions et 8 secteurs, dont 5 concernant la production ou la transformation d'énergie. Le modèle est fondé sur un emboîtement de fonctions CES permettant des substitutions partielles ou complètes entre facteurs de production ; tous les secteurs de production sont supposés en compétition parfaite, sauf le secteur pétrolier, pour lequel le prix est fixé de manière exogène. Une part importante des modèles d'équilibre général encore utilisés aujourd'hui appartiennent à la « filiation » de ce modèle GREEN.

2.1.3 Une mise en opposition Bottom-up / Top-Down entretenue mais de moins en moins éclairante

Si seuls les modèles d'équilibre général permettent d'examiner précisément certaines questions liées à la mise en œuvre des politiques de réduction des émissions et à leurs implications macroéconomiques, ils ne peuvent prétendre à l'exclusivité de l'évaluation des coûts. Les modélisations technico-économiques peuvent, eux, prétendre fournir une évaluation précise des coûts techniques ou sectoriels, grâce à la représentation des potentiels technologiques et des contraintes physiques pesant sur le système énergétique. Dans les exercices de modélisation mondiaux, comme l'Energy Modeling Forum, on retrouve les deux catégories de modèles sans pouvoir établir de frontière nette entre les deux catégories *au regard de leurs résultats*. Pourtant les limites des deux approches sont clairement identifiables – nous y reviendrons en détail au chapitre 2 : schématiquement, les modèles « top-down » sont critiqués pour leur représentation peu tangible et peu maîtrisée des possibilités techniques, par leur caractère agrégé et purement monétaire, tandis que les modèles « bottom-up » ignorent le rôle du système économique entier dans l'évolution des signaux-prix et des contraintes de budget qui sont déterminantes dans la bifurcation des systèmes techniques. Ces différences ont historiquement donné lieu à de nombreux débats, par exemple autour du nécessaire bouclage macroéconomique, autour de la nature des coûts mesurés ou à propos de l'existence et de l'ampleur des *potentiels sans-regrets* (GIEC, 1995).

La mise en opposition des approches « top-down » (TD) et « bottom-up » (BU) qui se dessine ainsi dès le début des années 80 va ensuite constituer un véritable fil rouge des discussions autour de la modélisation. Le second rapport d'évaluation du GIEC (1995, ch. 8) fait état de cette vision polaire dans sa taxonomie des modèles existants, en incluant dans la catégorie top-down les trois types d'outils évoqués plus haut : les modèles d'équilibre général multisectoriels, les modèles compacts d'optimisation intertemporelle, et les modèles macro économétriques.

Cependant le rapport mentionne qu'il est à la fois difficile et peu éclairant de tracer des limites aussi nettes entre les catégories, en raison d'efforts croissants de couplage ou d'hybridation des approches pour pallier leurs défauts respectifs. Ce diagnostic est repris dans des termes similaires dans le rapport d'évaluation suivant (GIEC, 2001), dans lequel le chapitre 7, consacré à l'évaluation des coûts des politiques, inclut un classement en six catégories (cf. Tableau 3), mais insiste de nouveau sur

les limites de ce classement, d'une part à cause des modèles qui chevauchent plusieurs catégories, d'autre part parce qu'il semble que les sorties des modèles dépendent au moins autant de leur différences de paramétrage que de leur structure propre (Hourcade et Robinson, 1996). Finalement, le paysage des modèles « mis en place » au milieu des années 90 n'a pas connu de « rupture » significative (cf. Tableau 3) ; il a évolué lentement dans le sens d'un dialogue entre les différentes approches. On retrouve les mêmes paradigmes de modélisation dans la synthèse récente de Edenhofer et al. (2006), qui distingue quatre classes d'outils selon le principe de calcul de la trajectoire :

(i) **les modèles de croissance optimale**, construits sur un principe de *maximisation intertemporelle du bien-être social* ;

(ii) **les modèles du système énergétique**, destinés à minimiser les coûts de fourniture des services énergétiques ;

(iii) **les modèles de simulations,** notamment économétriques, et les systèmes dynamiques;

(iv) **les modèles d'équilibre général**, structurés autour d'équilibres offre-demande sur tous les marchés et d'équilibres emplois-ressources pour tous les agents représentatifs.

Tableau 3 : Taxonomies successives des modèles de simulation de long terme

			Top down		
SAR, 1995	**Bottom up**		Équilibre général	Optimisation intertemporelle	Macro économétriques
TAR, 2001	Optimisation du système énergétique	Simulations équilibre partiel	Input-Output ; Équilibre général		Keynésiens de court terme ; Économétriques
Edenhofer et al., 2006	Modèles du système énergétiques	Simulations ?	Équilibre général	Croissance Optimale	Simulations, systèmes dynamiques

Comme les précédentes, cette dernière classification n'est pas suffisante pour rendre compte de l'état de l'art. Elle n'est pas non plus exempte d'imprécisions, en particulier concernant la troisième catégorie mentionnée ci-dessus, catégorie qui n'est pas clairement définie. Certes, elle a l'avantage « d'étiqueter » les modèles à partir de l'information précise du « moteur » de recherche de la solution du modèle. Revers de la médaille, il y a un risque de perception restreinte des possibilités de chaque catégorie de modèle, comme c'est souvent le cas par exemple avec le terme « d'équilibre général » (auquel on associe, à tort, des comportements supposés optimaux, des marchés parfaits ou encore une égalisation de toutes les productivités marginales des facteurs).

En réalité, ces tentatives de taxonomie échouent à fournir des clés d'analyse claires du paysage des modèles, notamment parce que les différences des modèles ne portent pas seulement sur leur structure globale mais sur des subtilités complexes de spécification et de paramétrage. Un observateur non expert restera perplexe quant à la transparence des outils utilisés ; il pourra même être inquiet quant aux possibilités de compréhension des causalités entre la structure des modèles et leurs résultats. Sans surprise, les modélisateurs reconnaissent explicitement que le comportement d'un modèle dépend autant de la qualité des données numériques que de ses spécifications mathématiques (Weyant et Hill, 1999 ; MacCraken et al., 2000).

2.1.4 Le développement récent des modèles hybrides

Comme nous l'avons rappelé plus haut, les typologies de modèles sont devenues imprécises avec le développement de modèles hybrides. Dès le début des années 1980, les modélisateurs « bottom-up » ont cherché à ajouter un module macroéconomique global à leurs modèles sectoriels, focalisés à l'origine sur la représentation détaillée des technologies d'un ou plusieurs secteurs. Cet ajout visait à éviter d'être critiqué pour négligence des effets de rétroaction importants dans les secteurs non énergétiques. L'architecture de l'IIASA, en 1981, le modèle Edmonds-Reilly, en 1983, puis le modèle Global 2100 de Manne et Richels, en 1992, comportent ainsi tous les trois une forme réduite de rétroaction macroéconomique. Dans ces modèles, la partie macroéconomique est réduite à une expression agrégée, ce qui ne permet pas une évaluation de l'impact des politiques sur le système complet des prix relatifs, le revenu des ménages, les flux internationaux, etc. Il s'agit simplement de rendre la demande finale de services énergétiques élastique au prix de l'énergie, prix du carbone inclus.

A l'inverse, c'est plus tard, vers la fin des années 1990, que les modélisateurs « top-down » ont tenté de greffer dans leur représentation agrégée du changement technique des modules de choix discret des technologies, directement inspirés des modèles technico-économiques. Ainsi apparaissent des architectures dans lesquelles coexistent les équations de l'équilibre général et la description précise des technologies, comme SGM (Edmonds et al., 1993, Fawcett et Sands, 2005) ou le modèle de Böhringer (1998). Mais, en fait, ces efforts restent généralement cantonnés au système d'offre énergétique, et c'est sur la représentation de la demande que l'opposition bottom-up / top-down reste vive, avec une désagrégation fine des usages finaux d'un côté et des fonctions agrégés à facteurs substituables de l'autre côté.

Le terme « hybride » reste aujourd'hui une étiquette mal définie, il désigne aujourd'hui au moins trois pratiques distinctes :

- *Pseudo-hybride* : cette étiquette désigne les cas où le modèle dit « hybride » ne permet pas réellement de combiner les apports respectifs des approches bottom-up et top-down. C'est le cas par exemple des modèles « bottom-up » simplement dotés d'un module macroéconomique compact, comme ETA-MACRO : cette adjonction ne change pas la nature technico-économique des modèles et elle ne permet pas d'y résoudre l'absence de description des dynamiques intersectorielles, internationales ou redistributives. C'est un « tout petit pas » vers la prise en compte d'une rétroaction globale du prix de l'énergie sur la croissance économique ou la demande finale de services énergétiques. De même, lorsque l'on calibre un modèle TD (resp. BU) avec des élasticités estimées sur les résultats d'un modèle BU (resp. TD), on ne peut qualifier cette pratique « d'hybridation des modèles », même si elle peut apporter une plus grande robustesse.

- *'Soft link'* : c'est ainsi que Böhringer et Rutherford (2006) désignent le couplage de deux modèles préexistants. Cette catégorie regroupe les cas où l'on met en place un échange de données ou de paramètres entre deux modèles, en les résolvant en boucle, jusqu'à trouver un état ou une trajectoire de convergence de leurs sorties. Par exemple, Manne et Rutherford (1994) ont ainsi couplé un modèle d'équilibre général avec un modèle énergétique ; Drouet et al. (2004) ont couplé le modèle d'équilibre général GEMINI-E3 avec un module de type MARKAL consacré au secteur résidentiel ; Schäfer et Jacoby (2005) ont couplé le modèle d'équilibre général EPPA avec un modèle de partage modal et un module de type MARKAL consacré au secteur transport. La convergence numérique entre les modèles est un problème récurrent dans toutes ces tentatives

d'hybridation ; en général les modélisateurs reconnaissent les difficultés de produire une trajectoire cohérente entre les deux modèles et renoncent au bouclage complet des deux modèles, l'expérience se réduit alors à un couplage dans un seul sens (par exemple MARKAL ⇨ EPPA).

- '*Hard link*' : il s'agit ici d'outils conçus comme *hybrides* dès l'origine et non par couplage de modèles préexistants. C'est le cas du modèle de Böhringer et Löschel (2006), qui propose une résolution simultanée des équations de l'équilibre général et de l'optimisation du panier technologique. C'est aussi le cas de l'architecture flexible O^{bj}ECTS, développée par Kim et al. (2006) à partir de l'expérience acquise avec les modèles SGM et MiniCAM : cette architecture propose une hiérarchisation éclairante des niveaux d'agrégation des équations modélisées. On peut aussi noter le modèle SIMS de Jaccard et al. (2000), qui élargit le paradigme BU vers une meilleure prise en compte des comportements réels. Enfin, le modèle E3MG (Barker et al., 2006) est à la fois l'unique modèle macro-économétrique appliqué à l'énergie et un modèle hybride incorporant une représentation détaillée des technologies. Enfin, nous le détaillerons au chapitre 3, l'architecture IMACLIM-R, développée dans le cadre de cette thèse, peut aussi être rangée dans cette catégorie.

Globalement, on peut se demander si l'ancrage fort dans les paradigmes historiques n'a pas constitué un frein à *l'invention* de nouveaux modèles. Au lieu de placer le caractère hybride au cœur d'un cahier des charges en amont du développement des modèles, la majorité des cas d'hybridation correspondent en fait à un couplage de modèles préexistants. Ce n'est que récemment que les travaux « hard link » ont fait émerger des architectures innovantes intégrant à la fois les dynamiques technologiques et les interactions macroéconomiques.

Ce retour historique sur le développement de la modélisation dans le champ énergie-climat ne prétend pas à l'exhaustivité ; il contribue cependant à fournir des clés de compréhension des filiations de méthode – qui s'apparentent aussi des filiations de pensée – qui sous-tendent l'état de l'art actuel. Nous retrouverons l'omniprésence de ces filiations de pensée dans les analyses transversales du second chapitre.

2.2 Typologie : le jeu répétitif de 5 familles

L'analyse des outils mobilisés en amont des scénarios est sensiblement plus complexe que l'analyse des intervalles d'incertitude sur les grandes variables agrégées de l'identité de Kaya, parce qu'il s'agit de traiter une information diffuse et parfois incomplète sur le contenu et la nature des modèles. Ceci explique la raison pour laquelle ce type d'analyse systématique des outils est quasiment absent de la littérature, mis à part les typologies très générales que nous avons déjà évoquées.

Le Tableau 4 contient la liste des modèles explicitement mentionnés dans la base de données du GIEC[16], ainsi que le nombre de scénarios correspondant. Nous avons pu identifier 55 modèles utilisés pour 698 scénarios sur un total de 959, ce qui correspond à 72% du nombre total des scénarios recensés. Les scénarios pour lesquels il était impossible d'établir une correspondance avec un modèle correspondent soit aux scénarios les plus anciens dans la base de données, soit à des scénarios

[16] Il s'agit en fait de l'assemblage des informations contenues dans la version 3.0 rendue publique en janvier 2007 contenant des scénarios publiés jusqu'en 2002, **et** dans l'annexe 2 de (Hanaoka et al., 2006a) qui recense les nouveaux scénarios publiés entre 2002 et 2006.

discursifs ou ne reposant sur aucun modèle publié dans la littérature. Dans le tableau ci-dessous, chaque entrée correspond à la dénomination d'un modèle, avec parfois des évolutions importantes de structure et de calibrage réalisées au cours des versions successives du modèle. Lorsque ces évolutions représentent des variantes suffisamment importantes et explicitement mentionnées, nous les avons reporté comme deux modèles distincts : c'est le cas en particulier de MARKAL et MARKAL-MACRO, MESSAGE et MESSAGE-MACRO.

Cette liste suggère deux remarques :

- quantitativement, le nombre de modèles présents suggère une importante diversité d'outils ; la majorité des modèles présents dans la littérature ou dans les colloques internationaux sur les dossiers climat et énergie est mentionnée ici, avec des exceptions notables (par exemple POLES et PRIMES, deux modèles très présents dans les projets de recherche européens, ou encore *G-Cubed* (McKibbin et al., 1998), modèle australien reconnu et original par certaines de ses spécifications, comme sa représentation endogène des marchés de capitaux[17]).

- Le nombre de scénarios publiés dans la base de données pour chaque modèle est très variable, allant d'une contribution isolée à une soixantaine de trajectoires (MiniCAM). De ce fait, les modèles bénéficient d'une lisibilité hétérogène, qui peut résulter de différences aussi bien dans le dynamisme scientifique des équipes, variable selon les périodes entre 1990 et 2006, que dans leur bonne volonté à mettre à disposition des scénarios complets pour alimenter la base de données.

[17] Le modèle GTEM présent dans la base de données est proche de G-Cubed dans son approche.

AIM	69	IPAC emission	2
AMIGA	2	KFA-STE	1
ASF	22	Khanna Chapman	1
CETA	19	LDNE	13
Climate Research and Policy Synthesis Model	10	LEAP	2
COMBAT	6	MARIA	39
Connecticut Model	10	MARKAL	16
DEMETER	20	MARKAL MACRO	5
DICE	11	MERGE	36
DNE21	8	MESSAGE	39
E3MG	3	MESSAGE MACRO	5
EDGE	2	MIND 1.1	3
ENTICE BR	4	MiniCAM	58
EPPA	30	MIT	7
EURICES/PRO	1	New Earth 21	4
FEEM RICE	19	PAGE	8
FLAMES	4	PETRO	12
FUND 2.7	2	Policy Evaluation Framwork Model	1
GEMINI E3	2	RAND	2
GET	12	RICE	8
Global 2100	3	SGM	49
GRAPE	15	SIMA	1
GREEN	5	TARGETS	3
GTEM	2	TEESE	2
IEA – World Energy Model	6	UK-ECCO	1
IMACLIM-R	3	WIAGEM	3
IMAGE TIMER	46	WorldScan	28
ICAM	13		

Tableau 4 : Modèles et Nombre des scénarios associés (698 scénarios)

Sources : base de données version 3.0 avec mise à jour personnelle à partir des informations publiées dans Hanaoka et al. (2006)

Cette liste apparemment touffue de 55 modèles nous conduit à souligner qu'il existe des filiations très étroites entre modèles, finalement révélatrices d'un ensemble beaucoup plus restreint de types d'outils. A partir d'une analyse systématique des descriptions disponibles pour les modèles de cette liste, nous avons identifié 5 familles principales et nous avons regroupé 41 des 55 modèles dans ces cinq catégories, comme le montre la Figure 4.

Sur les 14 modèles restants, trois sont représentés en dehors de ces grandes familles en raison de leur caractère hybride (SGM, Imaclim-R) ou de leur nature économétrique (E3MG) ; 11 modèles n'ont pas été classés dans cette figure soit parce que nous n'avons trouvé aucune documentation claire (KFA-STE, EDGE, EURICES/PRO, TARGETS, UK-ECCO), soit parce qu'ils ne sont pas capables de *générer* des scénarios de manière endogène – c'est-à-dire qu'ils sont uniquement conçus pour agréger des éléments de scénarios dans un cadre comptable (FUND, KAYA, Policy Evaluation Framework Model, Climate Research and Policy Synthesis Model) – soit, enfin, parce qu'ils se limitent à une sous partie du système énergétique trop limitée (FLAMES, SIMA).

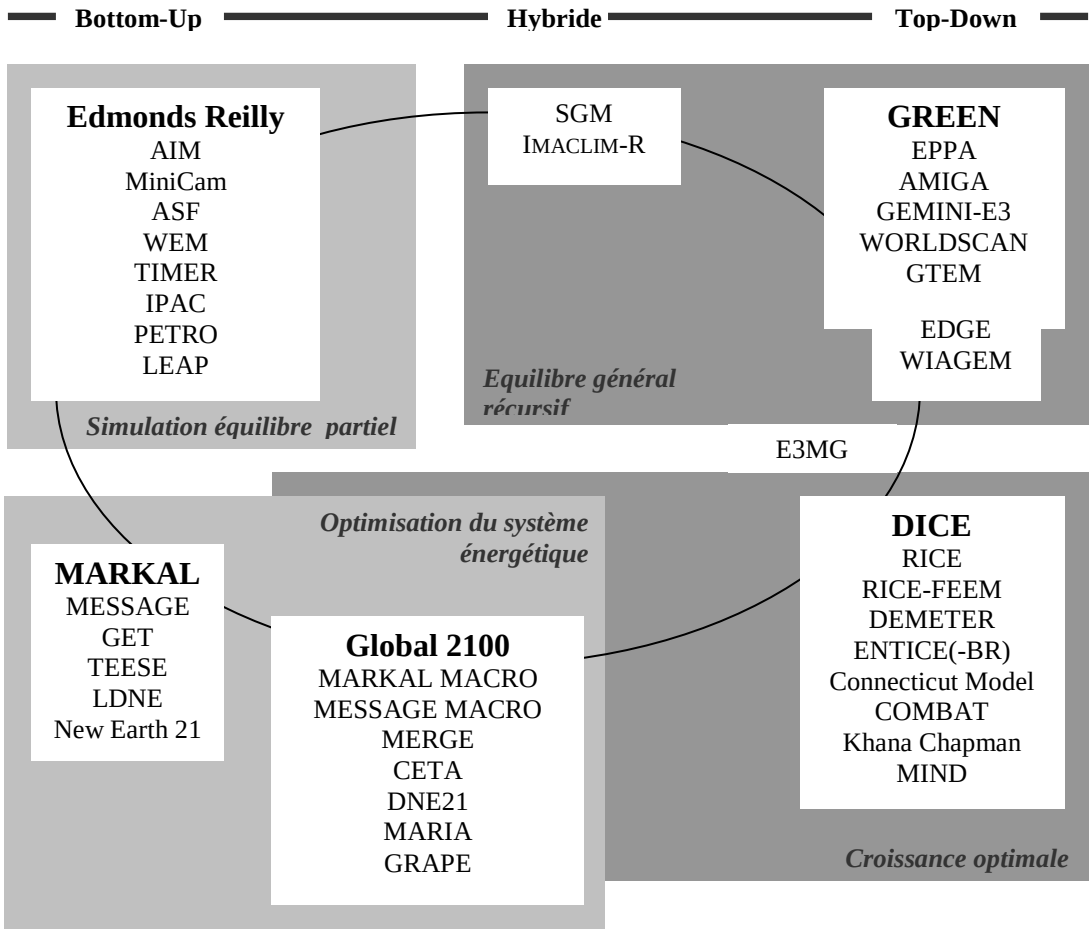


Figure 4 : Paysage des modèles mentionnés dans la base de données IPCC

Chacune des cinq familles de modèles est identifiée par le nom d'un **modèle emblématique**, soit par son statut de modèle fondateur (e.g. DICE, Edmonds Reilly), soit en raison d'une diffusion très large dans les travaux de modélisation (e.g. GREEN, MARKAL, Global 2100) :

- **<u>Famille Edmonds-Reilly (1983)</u>**

  Cet ensemble regroupe les **modèles de simulation du système énergétique en équilibre partiel**. Il n'y pas de parenté directe entre les modèles présentés ici, mis à part pour AIM et MiniCam, qui sont explicitement décrits comme des modèles construits à partir de la maquette d'Edmonds et Reilly. Ces modèles ont en commun de permettre des simulations « si…alors… » à partir de routines de comportement de certaines catégories d'acteurs ou de grandes variables économiques ou énergétiques. Leur niveau de complexité et leur système de résolution peuvent cependant varier significativement. Ainsi, TIMER ou MiniCAM représentent les équilibres simultanés des différents marchés énergétiques, avec une fixation endogène des prix, tandis que WEM ne fait que simuler, avec des équations explicites successives, la demande puis l'offre pour des prix énergétiques exogènes. Par ailleurs « l'esprit de parcimonie » d'Edmonds et Reilly dans leur choix du niveau de complexité de leur modèle n'est pas partagé par tous les modèles de la catégorie : AIM, ASF, TIMER sont beaucoup plus détaillés. Enfin, certains modèles incorporent une boucle complète avec les indicateurs d'activités macroéconomiques (dont le modèle original d'Edmonds et Reilly) et d'autres non (WEM par exemple).

- **<u>Famille MARKAL (Fishbone et al., 1983)</u>**

  Cette catégorie recouvre tous les **modèles d'optimisation du système énergétique**. Nous l'avons évoqué plus haut : cette approche s'inscrit dans la lignée des recherches sur l'analyse d'activité, utilisées pour la planification et la gestion optimale de systèmes complexes (transport, raffinage, etc.), avant la montée en puissance de la prospective énergétique dans les années 70. Le modèle MARKAL n'a pas la « parenté » de cette catégorie, puisque d'autres outils de ce type avaient été développés auparavant (Jorgenson et Houthakker, 1973; Finon, 1974 ; Nordhaus, 1977b), mais il en est devenu aujourd'hui l'outil le plus connu et le plus répandu. Ceci provient notamment de l'organisation d'un réseau d'équipes de recherche travaillant sur cet outil et mettant en partage ses multiples versions successives et régionales.

- **<u>Famille DICE (Nordhaus, 1993)</u>**

  Cette famille rassemble les **modèles macroéconomiques compacts d'optimisation intertemporelle**, au sein de laquelle le modèle DICE fait figure de « modèle source ». W. Nordhaus (1980) fut en effet le premier à formaliser le problème du contrôle optimal des émissions de gaz à effet de serre en utilisant un modèle intertemporel de croissance optimale, directement issu du modèle de Ramsey. Son approche a ensuite été largement réutilisée et adaptée : RICE est une version régionalisée par Nordhaus lui-même ; RICE-FEEM comporte en plus une modélisation de la coordination des politiques climatiques par la théorie des jeux ; DEMETER, ENTICE et MIND sont des adaptations plus perfectionnées de l'architecture de départ pour la prise en compte et l'étude du progrès technique induit. Le succès de ce type d'approche est en partie lié à la compacité du modèle et au soin apporté par Nordhaus à proposer une complète transparence sur les paramètres de son modèle, et à fournir une étude rigoureuse de la sensibilité du modèle à ces paramètres.

- **<u>Famille Global 2100 (Manne et Richels, 1990)</u>**

  Les modèles de cette catégorie peuvent tous être rattachés au « bi-modèle » ETA-MACRO, publié en 1977 par A. Manne et R. Richels. Nous l'avons mentionné plus haut, ceux-ci furent les premiers à proposer le **couplage d'un modèle détaillé du secteur énergétique** (ETA) **et d'un**

modèle compact macroéconomique (MACRO). Les modèles Global 2100, CETA, MERGE, MARIA sont des extensions de ETA-MACRO ; dans les modèles MESSAGE-MACRO et MARKAL-MACRO, l'architecture est semblable à celle de ETA-MACRO, mais ETA est remplacé par les modèles énergétiques MESSAGE ou MARKAL. Enfin, DNE21 et GRAPE incluent des modules similaires dans des architectures intégrées énergie-économie-climat, même s'ils ne comportent pas de référence explicite à cet héritage.

- **Famille GREEN (Burniaux et al., 1991)**
  Cette dernière catégorie rassemble les **modèles d'équilibre général multi-sectoriels**. Le modèle GREEN fait partie du peloton de tête des modèles de ce type ayant émergé dans le champ de l'économie de l'énergie et du climat au début des années 90. Le modèle EPPA du MIT s'inscrit directement dans la continuité de GREEN, il est à l'origine d'un nombre important de travaux depuis une décennie. Le modèle GTAP-E, qui n'est pas présent dans la base de données, est particulièrement proche dans ses spécifications ; les seules différences sont liées aux bases de données qui ont servi au calibrage des modèles. Les modèles GEMINI-E3, Worldscan et GTEM présentent des variantes sans changement significatif d'architecture. Au sein de cette catégorie, on peut distinguer les modèles dont la résolution dynamique est fondée sur un principe d'optimisation intertemporelle avec anticipations rationnelles, comme WIAGEM et EDGE, et ceux qui sont résolus « pas à pas » (modèles dits « dynamiques récursifs »). SGM, développé par Edmonds et al. (1993) et IMACLIM-R, le modèle élaboré dans le cadre de cette thèse, reposent aussi sur une structure d'équilibre général dynamique récursif, mais ils présentent de nombreuses innovations qui les distinguent de la filiation de GREEN et GTAP-E, notamment en ce qui concerne la description des itinéraires techniques, pour laquelle ils se rapprochent plus des modèles technico-économiques.

3 Conclusion

Ce chapitre brosse à grands traits un bilan de l'activité scientifique de modélisation prospective dans le champ énergie/climat, et en dégage quatre faits marquants :

- ✓ Le bilan quantitatif des activités de modélisation met en évidence **une activité croissante de développement des modèles et de production des scénarios :** la base de données non exhaustive du GIEC recense un millier de scénarios, générés par plus d'une cinquantaine de modèles différents. Ces chiffres témoignent du besoin incontournable d'étayer tout discours de prospective économique sur le long terme sur un ou plusieurs scénarios quantitatifs, qu'il s'agisse d'un travail à but scientifique ou d'une expertise auprès des décideurs.

- ✓ **Ce déploiement de moyens forme un paysage complexe** de modèles et de méthodes. Du point de vue d'un observateur extérieur, l'étalement des scénarios et la diversité des modèles qui les ont générés rendent périlleuse toute utilisation ex post des trajectoires ; les différences nombreuses et subtiles des outils – paramètres, variables, fonctions, niveau d'agrégation – augmentent les difficultés d'appréciation critique des résultats.

- ✓ Un **retour sur le développement historique des outils** depuis le début des années 70 permet d'une part de mieux comprendre les filiations entre outils et d'autre part de dégager quatre familles d'outils construites chacune autour d'un seul paradigme de modélisation. Une cinquième

« famille » est constituée par tous les travaux d'hybridation d'un modèle macroéconomique compact et d'un modèle d'optimisation énergétique. Cette catégorisation en cinq familles de modèles met en évidence un trait marquant de l'état de l'art de la modélisation : contrairement à l'abondance d'outils apparente dans le Tableau 4, il existe en réalité un nombre restreint de paradigmes de modélisation. Chacune des familles mentionnées ci-dessus est construite autour d'un de ces paradigmes, tous apparus dans les années 70 ou 80, sur la base de pratiques plus anciennes en économie. En matière de représentation de l'économie à long terme, aucune véritable innovation n'a bouleversé cet ensemble depuis une quinzaine d'années, la majorité des évolutions des modèles ayant seulement consisté en une augmentation de leur niveau de détail, avec un nombre croissant de secteurs économiques, des fonctions de production de plus en plus détaillées, ou encore un panel de technologies plus précis et plus vaste.

- ✓ L'identification de ce petit nombre de paradigmes de modélisation conduit naturellement à esquisser des lignes de fracture majeures dans les caractéristiques des modèles : la représentation de la croissance économique, la représentation des technologies, le ststut de l'optimalité dans les modèles. Au delà de la grille de déchiffrage proposée dans ce chapitre sur l'état de l'art de la modélisation, qui n'est donc qu'une première étape, le chapitre suivant s'efforce de proposer un diagnostic plus profond selon ces trois lignes de fracture. En examinant les modèles courants à la lumière d'un certain nombre d'éléments de corpus théorique développé hors du champ énergie / climat, nous allons identifier les atouts et les faiblesses des méthodes employées, avant d'esquisser des pistes de progrès.

Références

Barker, T., Pan, H., Köhler, J., Warren, R. and Winne, S., 2006, "Decarbonizing the Global Economy with Induced Technological Change: Scenarios to 2100 using E3MG", In Edenhofer, O., Lessmann, K., Kemfert, K., Grubb, M. and Köhler, J. (eds) *Induced Technological Change: Exploring its Implications for the Economics of Atmospheric Stabilization*, Energy Journal Special Issue on the International Model Comparison Project

Baron, R., Salles, J. F., 1991, "*Comparaison des travaux de prospective énergétique à long terme et évaluation de différents scénarios relatifs au problème de l'effet de serre*", Rapport de recherche auprès du Ministère de l'Environnement, 163 pp., INIST-CNRS

Bernanke, B., Jorgenson, D., 1975, "The Integration of Energy Policy Models", *Computers and Operations Research* , Vol. 2, No. 3, September 1975

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

Böhringer, C., Löschel, A., 2006, "Promoting Renewable Energy in Europe: A Hybrid CGE Approach", *The Energy Journal*, Special Issue "The Hybrid Modelling: New Answers to Old Challenges", 123-138

Böhringer, C., Rutherford, T. F., 2008, "Combining bottom-up and top-down", *Energy Economics*, 30, 547-596

Burniaux J. M., Martin, J. P., Nicoletti, G., Oliveira Martins, J., 1991, "GREEN - A Multi-Region Dynamic General Equilibrium Model for Quantifying the Costs of Curbing CO_2 Emissions: A Technical Manual", OECD Economics Department Working Papers 104, OECD Economics Department

Castles, I., Henderson, D., 2003, "The IPCC Emission Scenarios: An Economic-Statistical Critique", *Energy and Environment*, Vol. 14, No. 2&3, pp. 159-185

Drouet, L., A. Haurie, M. Labriet, P. Thalmann, M. Vielle, and L. Viguier, 2005, "A coupled bottom-up / top-down model for GHG abatement scenarios in the housing sector of Switzerland", In *Energy and Environment, Mathematics of Decision Making*, pages 27-61. Springer, New York, 2005

Edenhofer, O., Lessmann, K., Kemfert, C., Grubb M., Koehler J., 2006, "Technological Change: Exploring its Implications for the Economics of Atmospheric Stabilization", *The Energy Journal* Special Issue, "Endogenous Technological Change and the Economics of Atmospheric Stabilization", 93

Edmonds, J., Reilly, J., 1982, "The IEA/ORAU Long-Term Global Energy-CO_2 Model: Personal Computer Version A84PC". Institute for Energy Analysis, Oak Ridge Associated Universities, Washington, D.C.

Edmonds, J.A., Reilly, J.M., 1983, "A long-term global energy-economic model of carbon dioxide release from fossil fuel use", *Energy Economics* 5(2): 74-88

Edmonds, J.A., H.M. Pitcher, D. Barns, R. Baron and M.A. Wise, 1993, "Modeling Future Greenhouse Gas Emissions: The Second Generation Model Description", in *Modeling Global Change*, Lawrence R. Klein and Fu-chen Lo, eds. United Nations University Press, New York

Edmonds, J.A., 1983, "The Long-Term Global Energy-CO_2 Model: Software description", Institute for Energy Analysis, Oak Ridge Associated Universities, Washington, D.C.

Ehrlich, P., Holdren, J., 1972, "Review of The Closing Circle", *Environment*, April, 24-39

Fawcett, A., Sands R., 2005, "The Second Generation Model: Model Description and Theory", working paper PNNL-15432, http://www.epa.gov/oar/sgm_theory_final_1.pdf

Finon, D., 1974, "Optimization model for the French energy sector", *Energy Policy* 2(2): 136-151

Fishbone, L.G., Giesen, G., Goldstein, G., Hymmen, H.A., Stocks, K.J., Vos, H., Wilde, D., Zelcher, R., BaIzer, C., and Abilock, H., 1983, “User's Guide for MARKAL (BNLIKFA Version 2.0) A Multi-period Linear-programming Model for Energy Systems Analysis”. Brookhaven National Laboratory, Long Island, USA, and Kernforschungsanlage Jülich, Jülich, FRG, 1983.

Frisch, J.-R., Brendow, K., Saunders, R., 1989, *Horizons énergétiques mondiaux: 2000-2020*, Editions TECHNIP, 378 pp., 1989

GIEC, 1995, *Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions of Climate Change, Contribution of Working Group III to the Second Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, J.P.Bruce, H.Lee, E.F.Haites (Eds), Cambridge University Press, UK, 448 pp.

GIEC, 2001, *Climate Change 2001: Mitigation, Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, Bert Metz, Ogunlade Davidson, Rob Swart and Jiahua Pan (Eds.), Cambridge University Press, UK. 700 pp.

GIEC, 2007, *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., 851 pp.

Gilotte, L., 2004, *Incertitude, inertie et choix optimal. Modèles de contrôle optimal appliqués au choix de politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre*, Thèse de Doctorat : SCI. ECON. (Analyse et Politique Économiques) : De Lara, M.(dir.) : Paris, ENPC (Ecole Nationale des Ponts et Chaussées), 175 p.

Goldemberg, J., Johansson, T.B., Reddy, A.K.N., and Williams, R.H., 1988, *Energy for a Sustainable World*, Wiley-Eastern, New Delhi, 571 pp., January.

Grübler, A., Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., Fenhann, J., Hare, B., Mori, S., Pepper, B., Pitcher, H., Riahi, K., Rogner, H.-H., La Rovere, E., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, R.P., Swart, R., Victor, N., Yong Jung, T., 2004, “Emissions Scenarios: A Final Response”, *Energy and Environment*, Vol. 15, No. 1, pp. 11-24

Häfele, W., 1981, *Energy in a Finite World*, Ballinger Publishing Company, Cambridge, MA

Hanaoka, T., M. Kainuma, R. Kawase, and Y. Matsuoka, 2006, “Emissions Scenarios Database and Regional Mitigation Analysis: A Review of Mitigation Scenarios since the IPCC Third Assessment Report”, *Environmental Economics and Policy Studies*, Vol.7, No.3, pp.367-389

Hansen, J., D. Johnson, A. Lacis, S. Lebedeff, P. Lee, D. Rind, and G. Russell, 1981, “Climate impact of increasing atmospheric carbon dioxide”, *Science*, 213, 957-966

Hoffman, K.C., 1973, "A Unified Framework for Energy System Planning," in Searl, *Energy Modeling*, Resources for the Future, Inc., Washington, D.C., pp. 110-143

Hourcade, J.C., 1984, *Prospective de l'énergie et stratégies de développement dans le tiers monde*, Thèse de Doctorat d'Etat en Sciences Economiques, Université Paris VIII Vincennes à Saint-Denis, octobre

Hourcade, J.C., Kalaydjian, R., 1987, “Macroéconométrie et choix technologiques structurants : bilan et questions à partir du domaine de l'énergie”. XIXe colloque Structures économiques et économétrie, organisé par l'ARAE (Association Rhodanienne pour l'avancement de l'économétrie), le LATAPSES CNRS et l'Equipe Economie et économétrie de l'environnement, Sophia-Antipolis, 21-22 mars

Hourcade, J. C., Journé, V., 2003, “Monsieur Homais, les guides de montagne et le maître nageur - Variations sur la négation des risques climatiques”, *Critique Internationale*, n°18, 2003/1, 65-79

Hourcade, J. C., Robinson, J., 1996, “Mitigating Factors: Assessing the Costs of Reducing GHG Emissions”, *Energy Policy*, 24 (10/11), 863-873

Jaccard, M.K., Nyboer, J., Bailie, A., Taylor, A., Sadownik, B., Laurin, A., Murphy, R., Bataille, C; Nanduri, M., D'Abate, R., Lai, C., 2000 : *Integration of GHG Emission. Reduction Options*

using CIMS. Rapport préparé pour Analysis and Modelling Group Climate Change National Implementation Process

Jorgenson, D.W., Houthakker, H.S., 1973, *US energy resources and economic growth* (Series). Washington DC, Energy Policy Project

Jorgenson, D.W., Wilcoxen, P.J., 1990, "The Cost of Controlling U.S. Carbon Dioxide Emissions", in Proceedings of the Workshop on Economic/Energy/Environmental Modeling for Climate Policy Analysis, D.O. Wood and Y. Kaya. Center for Energy Policy Research and Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, and Department of Electrical Engineering, University of Tokyo Global Environmental Study Laboratory, Tokyo

Keeling, C.D., Bacastow, R.B., 1977, "Impact of industrial gases on climate", in *Energy & Climate. Studies in Geophysics*, National Academy of Sciences, Washington, D.C., 72-95

Kim, S.H., J. Edmonds, J. Lurz, S. J. Smith, M. Wise, 2006, "The ObjECTS Framework for Integrated Assessment: Hybrid Modeling of Transportation ", *The Energy Journal*, Hybrid Modeling, Special Issue #2, 2006

Koopmans, T., 1951, *Activity Analysis of Production and Allocation*, volume 13 of Cowles Commission Monograph, pages 33--97. John Wiley & Sons, New York

Lomborg, B., 2001, *The Skeptical Environmentalist: Measuring the Real State of the World*, Cambridge University Press, 2001

Lovins, A.B., LH. Lovins, F. Krause, W. Bach, 1981, *Energy Strategies for Low Climate Risk*. Report for the German Federal Environmental Agency, International Proiect for Soft-Energy Paths, San Francisco, CA, USA

Lovins, A.B., 1977, *Soft Energy Paths: Toward a Durable Peace*, Penguin Books

MacCracken, C. N., Edmonds, J. A., Kim, S. H., Sands, R. D., 2000, "The Economics of the Kyoto Protocol", *Energy Journal*, Vol. 21, suppl., pp. 25-72

MacDonald, G.F., H.Abarbanel, P.Carruthers, J.Chamberlain, H.Foley, W.Munk, W. Nierenberg, O.Rothaus, M.Ruderman, J.Vesecky, F.Zachariasen, 1979, "The long term impact of atmospheric carbon dioxide on climate", JASON Technical Report JSR-78-07, SRI International, Arlington, Virginia

Manne, A. S., Markowitz, H. M., 1961, "Studies in process analysis: economy-wide production capabilities", Proceedings of a Conference Sponsored by The Cowles Foundation for research in economics at Yale university, April 24–26, 427 pp

Manne A.S., Richels, R.G., 1977, "ETA-MACRO: A Model of Energy-Economy Interactions", in C. J. Hitch (ed.), *Modeling - Energy-Economy Interaction*, Resources for the Future, Washington, D.C., 1977

Manne, A.S. , Richels, R.G., 1990, "CO_2 emission reductions: an economic cost analysis for the USA", *The Energy Journal*, 11(2):51-75

Manne, A.S., Rutherford, T.F., 1994, "International trade, Capital Flows and Sectoral Analysis: formulation and solution of intertemporal equilibrium models," in W.W. Cooper and A.B. Whinston, eds., *New Directions in Computational Economics*, Springer, 1994, pp. 191-205

McKibbin, W. J., Wilcoxen, P. J., 1998, "The theoretical and empirical structure of the G-Cubed model", *Economic Modelling*, Elsevier, vol. 16(1), pages 123-148, January

McKibbin, W. J. , Pearce, D., Stegman, A., 2007, "Long term projections of carbon emissions", *International Journal of Forecasting*, Elsevier, vol. 23(4), pages 637-653

Mintzer, I., 1987, "A Matter of Degrees: The Potential for Controlling the Greenhouse Effect", Research Report #5, World Resources Institute, Washington, D.C.

Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A. et al., 2000, *Special Report on Emissions Scenarios*, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press, Cambridge

Nakicenovic N., P. Kolp, K. Riahi, M. Kainuma, T. Hanaoka, 2006, "Assessment of Emissions Scenarios Revisited", *Environmental Economics and Policy Studies*, 7(3):137-173

Nordhaus, W., 1977a, "Economic Growth and Climate: The Carbon Dioxide Problem", *American Economic Review*, (February 1977), 67(1): 341-346 [Cowles Foundation Discussion Paper 435, 18pp]

Nordhaus, W., 1977b, "The Demand for Energy: An International Perspective," in William Nordhaus, ed., Chapter 13, *International Studies of the Demand for Energy*, North-Holland Publishing Company, 1977

Nordhaus, W., 1979, *The Efficient Use of Energy Resources*, Yale University Press, 1979

Nordhaus, W., 1980, "Thinking about carbon dioxide: theoretical and empirical aspects of optimal control strategies", Cowles Fundation Discussion Paper No 565, Yale University, October 1980

Nordhaus, W., Ausubel, J., 1983, "A Review of Estimates of Future Carbon Dioxide Emissions," National Research Council-National Academy of Sciences, Changing Climate, National Academy Press, 1983

Nordhaus, W., Yohe, G., 1983, "Future Carbon Dioxide Emissions from Fossil Fuels", in National Research Council-National Academy of Sciences, *Changing Climate*, National Academy Press, 1983

Nordhaus, 1992, "An Optimal Transition Path for Controlling Greenhouse Gases", *Science*, vol. 258, November 20, 1992, pp. 1315-1319

Nordhaus, W., 1993, "Optimal Greenhouse-Gas Reductions and Tax Policy in the 'DICE' Model", *American Economic Review*, May 1993, vol. 83, pp. 313-317

Perroni, C., Rutherford, T., 1991, "lnternational trade in carbon emissions rights and basic materials : general equilibrium calculations for 2020", OECD miméo

Rana A., Morita, T., 2000, "Scenarios for Greenhouse Gas Emissions: A Review of Modeling of Strategies and Policies in Integrated Assessment Models", *Environmental Economics and Policy Studies*, 3, 2, 267-289

Reilly, J., Edmonds, J., Gardner, R., Brenkert, A., 1987, "Uncertainty analysis of the IEA/ORAU CO_2 emissions model", *The Energy Journal*, Vol. 8 No.3, pp.1-29

Schäfer A., Jacoby H.D., 2005, "Technology Detail in a Multi-Sector CGE Model: Transport under Climate Policy", *Energy Economics*, 27(1): 1-24

Siegenthaler, U., Oeschger, H., 1978, "Predicting Future Carbon Dioxide Levels", *Science*, vol. 199, pp. 188-195

Sterman, J. D., 1991, "A Skeptic's Guide to Computer Models", in Richardson, G. P. (Ed.) *Modelling for Management*, Aldershot, UK, Dartmouth Publishing Company

Weyant, J.P., Hill, J.N., 1999, "Introduction and Overview", *The Energy Journal*, Special Issue: The Costs of the Kyoto Protocol: A Multi-Model Evaluation, pp. vii-xliv

Whalley, J., Wigle, R., 1991, "Cutting CO_2 Emissions: The Effects of Alternative Policy Approaches", *The Energy Journal*, 12(1) 1991, pp. 109-24

Chapitre 2

Modèles en concurrence : représentations alternatives du monde réel ou insuffisances théoriques ?

‘The antihistorical school, which is now so common in the United States, where the history of thought is regarded as slightly depraved entertainment, fit only for people who really like medieval Latin, so that one became a fully-fledged, chartered Ph.D. economist without ever reading anything that was published more than ten years ago (…) leads to the development of slick technicians who know how to use computers, run massive correlations and regressions but who do not really know which side of anybody's bread is buttered, who are incredibly ignorant of economic institutions, who have no sense at all of the blood, sweat and tears that have gone into the making of economics and very little sense of any reality which lies beyond their data.’ (Boulding, 1971, 232-33, *cité par* Blaug, 2001)

Le chapitre précédent a permis de mettre en évidence que l'ensemble des modèles existants, à l'exception de quelques modèles hybrides innovants, pouvait être décrit à travers 5 paradigmes de modélisation. Si cette simplification est d'un intérêt certain pour rendre lisible le paysage de la modélisation, il peut sembler curieux, d'un point de vue plus épistémologique, que ces différentes familles de modèles continuent de coexister et d'évoluer en parallèle, alors qu'elles proposent des représentations différentes d'un même objet : la croissance économique et son contenu énergétique. En effet, il serait naturel de penser que l'une ou l'autre de ces représentations finisse par être reconnue supérieure aux autres, notamment au regard de sa robustesse empirique, et que cette supériorité débouche sur la réfutation et l'abandon des approches jugées moins acceptables[18]. En fait, plusieurs facteurs peuvent expliquer la persistance de cette coexistence :

(i) L'absence de modèle idéal de l'économie globale.

La projection à long terme des trajectoires de croissance future et de leur contenu énergétique, ainsi que l'évaluation des politiques visant à induire des bifurcations de grande ampleur, imposent à l'économiste modélisateur un cahier des charges d'*exhaustivité* dans la représentation des variables et des mécanismes clés de la croissance mondiale, du changement technique et structurel. Cette exigence bute contre l'inexistence d'un unique modèle économique suffisamment général pour intégrer *ensemble* les meilleures représentations des déterminants endogènes de la croissance globale, des échanges financiers intertemporels et internationaux, des changements technologiques, des réorganisations spatiales des activités, des évolutions de préférences, etc. La conception des différents paradigmes de modélisation est le résultat de visions différentes – vision d'ingénieur ou vision d'économiste – ou d'écoles de pensée au sein de l'économie, sans qu'aucune approche ne puisse être admise comme « Pareto-supérieure » aux autres. Même l'hybridation des approches, conçue pour être supérieure à ces approches considérées isolément, ne résout pas la totalité des controverses méthodologiques et théoriques qui existent dans la représentation de l'économie globale et introduit, en général, une complexité supplémentaire susceptible de rendre le modèle plus difficile à contrôler[19].

(ii) Le masque des incertitudes paramétriques.

Il semble que l'étalement des scénarios de long terme provienne plus de l'incertitude sur les paramètres des modèles que de leurs différences structurelles. Il est en effet impossible d'isoler, dans le panel de scénarios de la base du GIEC par exemple, des paquets de scénarios disjoints à partir du seul critère de la famille de modèles ayant servi à les produire. Dans ces conditions, l'incertitude sur les paramètres des modèles rend impossible la réfutation d'une approche parmi d'autres à partir des scénarios quantitatifs qu'elle a permis de générer jusque là.

(iii) L'absence de test de validité empirique sur les trajectoires historiques.

Mis à part les modèles macroéconométriques très peu représentés dans l'étude des trajectoires économie-énergie à long terme (par ex. E3MG), les modèles que nous avons évoqués jusque là ne sont jamais estimés ni validés sur des trajectoires historiques. Dans une proportion qui varie d'un modèle à l'autre, la seule validité empirique vient de l'estimation externe de certains paramètres – élasticités, asymptotes techniques, taux d'apprentissage, etc. – sur des séries temporelles, les autres paramètres

[18] On retrouve ici le particularisme épistémologique des sciences économiques clairement expliqué par Mouchot, (2003), selon lequel les programmes de recherche en économie sont généralement irréfutables et ne conduisent que rarement à l'abandon d'une théorie au profit d'une théorie supérieure.

[19] Ce fut par exemple la critique principale faite à l'encontre de l'architecture développée par l'IIASA dans les années 70 en réalisant un couplage complexe des modèles MESSAGE, MEDEE, IMPACT et MACRO.

étant déterminés *ad hoc* lors du développement des modèles. Il faut reconnaître que c'est là une faille majeure dans la rigueur scientifique de la majorité des travaux de modélisation actuels : la croissance continue de la complexité des modèles n'est aucunement accompagnée par un renforcement pourtant nécessaire de la robustesse des paramètres. Si les années 60-70 furent marquées par un engouement pour les développements mathématiques formels, non sans éviter un éloignement progressif de la réalité de l'économie, les quinze dernières années ont été caractérisées par un accès facilité au calcul numérique de grande taille, qui masque une négligence généralisée pour la qualité des données et la robustesse des simulations (comme en témoigne l'usage presque exclusif de la base de données GTAP pour les modèles multisectoriels mondiaux).

(iv) La persistance de controverses sur certains choix de modélisation

Enfin, pour arbitrer en faveur d'un modèle parmi d'autres, il faudrait pouvoir s'appuyer sur la supériorité avérée de certaines représentations pour décrire tel ou tel mécanisme. Or la science économique toute entière héberge une coexistence persistante de théories ou de représentations concurrentes (Mouchot, 2003), soit pour des raisons de niveau d'agrégation – la liaison des représentations macroéconomiques et microéconomiques restant un éternel casse-tête théorique et empirique –, soit parce qu'on ne peut les réfuter empiriquement (par ex. les travaux théoriques sur l'équilibre général), soit parce que même une réfutation empirique en bonne et due forme ne suffit pas à conduire à l'abandon d'une théorie (par ex. le théorème Heckscher-Ohlin-Samuelson sur le commerce international). Nous retrouvons donc sans surprise, au niveau des modèles que nous étudions ici, la variété des représentations « non discriminées » par les progrès de la science économique en général, comme autant de solutions « théoriques » acceptées même si elles sont déconnectées des données et observations du monde réel.

L'objet de ce chapitre est précisément de démêler, parmi les différentes pratiques de modélisation que nous avons identifiées ci-dessus, les cas dans lesquels les différences de représentations sont justifiées par des écarts dans les cahiers des charges à l'origine des modèles, de ceux dans lesquels elles sont des échos de controverses persistantes en économie, ou bien relèvent en fait de faiblesses scientifiques qu'il serait possible de corriger. Nous agrégerons ainsi les différentes « briques » du diagnostic à l'origine du développement du modèle IMACLIM-R.

Ce diagnostic est rendu complexe par la globalité de représentation des modèles de prospective énergie-économie. Ceux-ci intègrent en effet dans une architecture unique des pans de connaissance économique parfois distants voire disjoints dans la littérature économique : commerce international, dynamique des flux de capitaux, décisions d'investissements, changement technique, fonctionnement des marchés de l'énergie, théorie du développement, dynamiques de relocalisation industrielle, évolution des préférences, etc. Notre analyse des pratiques de modélisation et du corpus théorique qui les supporte ne peut pas prétendre à l'examen systématique de tous ces « objets » de l'économie. Nous structurons notre analyse autour des trois questions transversales identifiées au chapitre précédent :

(i) La représentation de la croissance économique globale ;

(ii) La représentation du contenu physique de la croissance, des univers techniques et de leur évolution ;

(iii) La représentation des décisions des agents économiques et le statut de l'optimalité.

Sur ces trois questions transversales, la coexistence de visions différentes dans les modèles, ainsi qu'un écart parfois significatif entre d'une part les connaissances théoriques et empiriques et d'autre part les pratiques des modélisateurs, font émerger des insatisfactions chroniques que nous mettrons en évidence au fur et à mesure de notre diagnostic.

1 La représentation de la croissance économique globale

1.1 Analyse des modèles existants

L'analyse de la modélisation de la croissance dans les outils recensés au chapitre précédent fait apparaître une certaine pauvreté de représentation, contrastant avec l'abondance de matériaux théoriques et empiriques dans la littérature économique sur la croissance. Parmi l'ensemble des modèles connus et répertoriés au premier chapitre, nous avons identifié les représentations suivantes :

a. Aucun modèle de croissance

Historiquement, la majorité des modèles énergétiques sectoriels fonctionne avec des hypothèses exogènes sur les trajectoires futures de croissance. C'est le cas des familles de modèle « Edmonds-Reilly » et « MARKAL », au moins dans la conception originale des modèles précurseurs. De cette croissance prescrite découle ensuite une demande de services énergétiques, que le modèle énergétique se charge de satisfaire. Pour prendre en compte l'existence d'une rétroaction importante des prix de l'énergie sur la croissance et répondre à une critique fréquente adressée aux modèles sectoriels, la trajectoire de PIB exogène est assortie d'une élasticité du PIB aux prix de l'énergie dans le modèle Edmonds-Reilly et ses dérivés, ou bien c'est au niveau de la demande finale qu'une élasticité aux prix de l'énergie est ajoutée, comme dans les versions révisées de MARKAL nommées MARKAL-Micro (Fonction d'utilité représentative) et MARKAL-ED (pour *Elasticity of Demand).*

b. Un modèle de croissance « exogène » récursif

Nous incluons dans cette catégorie les représentations dérivées du modèle néoclassique de Solow (1956, 1957). Dans le modèle de Solow, les déterminants du taux de croissance de long terme sont uniquement la population et le progrès technique général, prescrits de manière exogène, tandis que le taux d'épargne n'a pas d'impact sur le taux de croissance à long terme et n'influe que sur la vitesse de convergence vers l'équilibre de long terme et sur le niveau absolu du PIB par tête. La stabilité du sentier de production à long terme est assurée par l'hypothèse de l'existence d'une fonction de production agrégée à facteurs substituables (Cobb-Douglas dans le papier original mais ce n'est pas la forme mathématique de la fonction de production qui est déterminante, c'est l'hypothèse de substituabilité des facteurs en fonction des prix relatifs courants). Dans les modèles à plusieurs secteurs inspirés de celui de Solow, comme celui d'Uzawa-Inada (Uzawa, 1961 ; Inada, 1963), la stabilité de la trajectoire n'est plus systématique et l'on peut observer des comportements cycliques qui dépendent des caractéristiques techniques des différents secteurs et des arbitrages épargne/consommation.

On retrouve des représentations dérivées de ces modèles dans les modèles multisectoriels récursifs comme GREEN, EPPA, GTAP-E, SGM, Linkage, etc. Dans ces modèles la production des biens est décrite à travers des fonctions de production sectorielles[20], qui jouent un rôle similaire à la fonction de production agrégée dans le modèle de Solow, mais avec un niveau de désagrégation plus élevé des facteurs de production. Ces fonctions incorporent en général des paramètres d'évolution démographique et de progrès technique dont l'évolution est prescrite de manière exogène : pour le progrès technique il s'agit soit d'un coefficient de conversion de la force de travail en « travail effectif » (paramètre technique de productivité du travail *ex ante*), soit d'un paramètre de productivité générale des facteurs (PGF). Enfin, le stock de capital suit une classique relation d'accumulation

[20] Ces fonctions relèvent de formulations mathématiques standard en économie, de type Cobb-Douglas, CES - Constant Elasticity of Substitution, ou Leontief, ou encore une composition hybride de CES et de Leontief.

récursive – soit avec un taux de dépréciation constant soit avec des générations de capital mises au rebut en « fin de vie » – laquelle dépend de la règle d'allocation des investissements, d'un taux d'épargne exogène et à des flux de capitaux généralement exogènes.

c. Un modèle de croissance « exogène » intertemporel (taux d'épargne endogène)

Nous regroupons dans cette catégorie les modèles inspirés du modèle de Ramsey-Cass-Koopmans (Ramsey, 1928 ; Cass, 1965; Koopmans, 1965). Ce modèle est construit comme le modèle de Solow mais avec un taux d'épargne qui devient endogène, déterminé par la maximisation intertemporelle du bien-être ou du PIB. Il répond, au départ, au besoin d'une formulation mathématique tractable du problème d'un hypothétique planificateur bienveillant qui chercherait à déterminer le meilleur arbitrage épargne / consommation, au sens de la maximisation du niveau absolu de la consommation par tête[21]. Dans les modèles qui reprennent cette représentation, la justification du recours à une optimisation globale a progressivement évolué et nous discuterons la légitimité de cette approche dans la partie 3.

Cette spécification intertemporelle se retrouve aujourd'hui dans de nombreux outils de modélisation parmi les plus anciens dans le paysage de la modélisation des politiques climatiques : tous les modèles dérivés du module MACRO (inclus dans MERGE, MESSAGE-MACRO, MARKAL-MACRO), tous les modèles issus de DICE, ainsi que certains modèles d'équilibre général calculable (WIAGEM, EDGE). Pour produire un scénario de croissance avec ces modèles, la procédure de calibrage est généralement la suivante : (i) on suppose que l'économie se situe sur un sentier de croissance optimale, (ii) on fournit des hypothèses exogènes de taux de croissance de la population et du PIB, (iii) on calibre l'évolution de la productivité générale des facteurs « à l'envers » pour obtenir de manière endogène la croissance économique voulue, en fonction d'autres hypothèses sur les paramètres, notamment sur le taux d'actualisation.

d. Avec un modèle de croissance « endogène »

Les « nouvelles » théories de la croissance développées dans les années 80 et 90 (modèle AK de Romer (1986) ; innovation schumpétérienne (Romer, 1990 ; Aghion et Howitt, 1992) ; capital humain dans le modèle de Lucas (1988) ; investissements publics dans le modèle de Barro (1990)) n'ont eu qu'un écho partiel dans les modèles utilisés pour la prospective énergétique :

- D'une part, une recherche intense pour incorporer les mécanismes d'**induction du progrès technique** dans le domaine énergétique, avec représentation des mécanismes d'apprentissage (learning-by-doing) et de R&D (learning-by-searching). Cette endogénéisation du progrès technique dans le secteur énergétique peut se faire dans tous les modèles, car les mécanismes concernés – baisse des coûts des énergies alternatives ou innovantes, gains d'efficacité supplémentaires induits par la R&D, les investissements cumulés et les variations de prix relatifs – sont en fait représentés dans tous les modèles conçus pour la prospective énergétique ou climatique, de manière plus ou moins agrégée et plus ou moins complète. Mais cette démarche se heurte à deux nouvelles difficultés méthodologiques : d'une part la pauvreté des données permettant de calibrer les fonctions d'apprentissage, par nature inconnues à l'avance, d'autre part la possibilité d'existence d'équilibres multiples dès lors que l'on introduit des rendements croissants à travers les courbes d'apprentissage (Grübler et Messner, 1998) . Nous reviendrons sur les apports et les insuffisances de ces développements au paragraphe 2.2.

[21] Le modèle utilisé aujourd'hui est celui que Cass et Koopmans obtinrent en passant de la consommation par tête à l'utilité par tête, et en introduisant le taux de préférence pure pour le présent dans cette utilité.

- D'autre part, **quelques rares tentatives d'endogénéiser le moteur de la croissance lui-même** et la croissance du progrès technique global (une version du modèle DEMETER 2R, non publiée[22]; le modèle GEM-E3 (Fougeyrollas et al., 2005) ; le modèle IMACLIM-R, (Crassous et al., 2006) ; une version du modèle WITCH, (Bosetti et al., 2006)), mais ces expériences n'ont pas du tout retenu l'attention de la communauté scientifique jusque là, contrairement au problème de l'induction du progrès technique dans le domaine énergétique. L'endogénéisation du moteur de la croissance, dans la perspective originale des « nouvelles » théories de la croissance citées ci-dessus, ne peut se faire que si le moteur global de la croissance est représenté, soit de manière récursive (situation **b,** ex. GEM-E3) soit intertemporelle (situation **c,** ex. DEMETER).

Le
Tableau 5 résume les combinaisons existantes entre les cinq familles de modèles identifiées au chapitre 1 et les possibles représentations de la croissance que nous venons d'énumérer.

	Pas de modèle de croissance	**Récursif « à la Solow »**	**Intertemporel « à la Ramsey »**	**Modèle de croissance endogène**
Edmonds-Reilly				
MARKAL				
DICE				
Global 2100				
GREEN				

Tableau 5 : Modes de représentation de la croissance économique globale selon les familles de modèles
Gris foncé : représentation dominante ; Gris clair : représentation occasionnelle

Ces distinctions ne sont pas anodines, parce que la représentation des mécanismes de croissance revêt une importance particulière dans le champ de l'étude des politiques énergétiques climatiques, avec trois questions principales[23] :

- **L'évaluation des incertitudes sur les trajectoires futures**, qu'il s'agisse de fournir aux modèles climatiques des trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre pour l'évaluation des risques de changement climatique ou de simuler les trajectoires de développement et de contenu énergétique pour les risques géopolitiques et économiques liés à l'approvisionnement énergétique et à la stabilité économique mondiale. Dans tous les cas, l'encadrement des incertitudes sera d'autant plus pertinent que les choix de représentation des déterminants de la croissance future et de son contenu potentiel permettront de garantir la plausibilité des simulations ;

- **L'évaluation du coût de l'inaction,** par exemple des coûts liés aux dommages climatiques, ce qui exige de représenter les canaux par lesquels la croissance peut être modifiée par les modifications de l'environnement ;

[22] Projet européen Transust, http://www.transust.org/models/demeter/model_demeter.htm
[23] Voir Alcamo et al. (1994) pour une taxonomie similaire des enjeux de la scénarisation de long terme.

- **L'évaluation du coût net des politiques :** la mesure complète du chronogramme des pertes et des gains associés à une mesure nécessite de représenter la chaîne des mécanismes et ajustements qu'elle déclenche à court et moyen terme, y compris les rétroactions multiples et simultanées sur les forces motrices ou les freins de la croissance – investissements, progrès technique, balance extérieure, dette, etc.

La cohérence du discours sur les politiques énergétiques et climatiques, de leur pure « justification » à l'évaluation de leur niveau, de leur contenu et de leur efficacité, exige de traiter les enjeux ci-dessus avec les mêmes outils. Ceci implique le défi méthodologique majeur de parvenir à représenter dans un modèle unique non seulement le **moteur de la croissance à long terme**, et les incertitudes propres à sa vitesse et à sa direction, mais aussi **les mécanismes qui régissent à court ou moyen terme les transitions entre régimes de croissance** et les ajustements, quels qu'ils soient, liés aux politiques et mesures ou à des chocs exogènes géopolitiques ou climatiques. Derrière cet enjeu apparemment méthodologique, il est surtout question de la pertinence des messages délivrés à la communauté internationale en support des négociations et des décisions de politiques climatiques : seule une description plausible de la croissance économique peut conduire à formuler des mesures robustes à l'incertitude et crédibles pour des décideurs refusant tout risque de coût macroéconomique élevé, surtout à court terme (Hourcade, 2007).

Ce cahier des charges dans la représentation de la croissance économique est cependant loin d'être une entreprise triviale à cause d'un réel « compartimentage » des recherches sur la croissance en fonction de l'horizon temporel considéré, une segmentation qui nous conduit à traiter séparément des enjeux de représentation à long terme puis à court terme.

1.2 L'idée du rattrapage au cœur de la croissance à long terme

Dans la littérature économique, l'étude de la croissance de long terme est associée à deux questions principales :

- Quelles sont les conditions d'une croissance pérenne et stabilisée[24] ?
- Quels sont les déterminants du taux de croissance de cette croissance de long terme ?

C'est surtout cette seconde question, d'ordre positif, qui est présente dans la modélisation énergie-climat, puisqu'il s'agit de projeter une croissance réaliste de l'économie sur plusieurs décennies pour en dériver des projections de demande énergétique ou d'émissions de GES. Dans ce domaine, la contribution la plus déterminante dans l'histoire de l'économie de la croissance fut probablement celle de R. Solow (1956, 1957), comme le soulignait Joseph Stiglitz (1990) avec 35 ans de recul :

> 'For almost two decades, from the early 1950s through the late 1960s, growth theory dominated economic theory, and Bob Solow dominated growth theory. Seldom, if ever, a single paradigm, a particular set of questions and a particular approach to answering those questions, held such sway over a discipline.' (Stiglitz, 1990, p. 50)

A partir du modèle simple de Solow, un pan entier de la littérature, de Denison, (1962) jusqu'à Maddison (2001), s'est consacré à la comptabilité de la croissance passée, pour tenter d'identifier de manière robuste les déterminants de cette croissance. En fait, le champ des possibilités ouvert par Solow a largement dépassé le contexte théorique de son article de 1956. A l'époque, son propos était d'apporter une solution au malaise provoqué par les propriétés du modèle Harrod-Domar (Harrod,

[24] Ce qui se traduit, en termes techniques, par la recherche des équilibres stationnaires des modèles de croissance et l'examen de leurs propriétés de stabilité, dans la longue lignée des travaux de Ramsey.

1939, Domar, 1946) – selon lequel la croissance stabilisée est un situation instable et fortuite car régie par une égalité dans laquelle quatre paramètres sont fixés de manière indépendante (Solow, 1988). Son objectif était alors de démontrer, avec un modèle théorique compact, que *la stabilité à long terme des économies est possible*, grâce à un ajustement progressif de l'appareil productif le long d'un continuum de techniques à l'échelle macroéconomique et au cours du temps, incluant une possible substitution des facteurs capital et travail. Ce modèle prédit que le taux d'épargne n'influence pas le taux de croissance à long terme, et que le principal moteur de la croissance économique, hors démographie, semble être le progrès technique. Ces publications ont amorcé le développement de la théorie néoclassique de la croissance et ont donné lieu à de nombreux travaux pour tenter d'expliquer quantitativement les déterminants de la croissance. Le modèle fit l'objet d'un nombre considérable de travaux lui apportant divers éléments de complexité, mais le caractère paradigmatique du modèle d'origine ne fut guère entamé par ces raffinements successifs, à l'égard desquels Solow lui-même souligna *ex post* son scepticisme :

> 'I am inclined to think that not much more than this can be extracted from the one-sector theory of growth. (…) In fact, more general assumptions that any I have described can already be handled, although not very transparently. That is a useful activity, but I am not now thinking of publishable results but of usable insights in our real economies.' (Solow, 1970, p. 105, cité par Stiglitz, 1990).

L'utilité du modèle pour les projections de long terme dérive de son usage pour faire la comptabilité de la croissance : au lieu de l'employer comme cadre d'analyse des déterminants passés de la croissance, on alimente ce modèle avec des projections pour chacun des déterminants – population et productivité des facteurs – afin d'obtenir un scénario de croissance global.

Dans presque tous les cas, **les projections de population** sont réalisées par des modèles de démographie complètement indépendants des modèles que nous traitons ici ; une majorité de modélisateurs utilisent des projections issues de l'une des trois sources d'information internationales qui font autorité en la matière, hors de la sphère purement économique : le département des affaires économiques et sociales (DESA) des Nations Unies[25], le Census Bureau des Etats-Unis d'Amérique[26], et l'IIASA[27]. Dans tous les cas elles reposent sur une projection des cohortes de population et des transitions démographiques pour les PED. L'incertitude principale porte sur les futurs taux de fécondité, et les intervalles d'incertitude sur ce paramètre ont un impact cumulé très important sur le niveau et la structure de la population à long terme[28]. Malgré cela certaines dynamiques majeures sont robustes aux différentes hypothèses possibles, comme le vieillissement de la population chinoise ou l'inversion probable, hors migrations, du solde démographique de nombreux pays développés – Japon et Europe en tête.

Paradoxalement, la démographie est un des déterminants principaux de la croissance future mais l'attention qui y est consacrée reste très faible. La facilité d'accès aux projections « toutes faites » de l'ONU masque une réelle pauvreté d'analyse chez la majorité des modélisateurs, mis à part les équipes qui ont le concours de démographes en interne, comme l'IIASA ou le RIVM. Une des contributions éclairantes sur les dynamiques importantes à long terme est le travail réalisé au sein de l'OCDE par Oliveira Martins et al. (2005), qui montre l'intérêt de ne pas s'en tenir aux projections de population totales et actives, mais encourage à expliciter précisément les dynamiques du taux de participation, du

[25] Population Division, http://www.un.org/popin/wdtrends.htm
[26] International Database, http://www.census.gov/ipc/www/idbnew.html
[27] World Population Program, http://www.iiasa.ac.at/Research/POP/proj01
[28] On pourra consulter Duncan et Wilson (2004) pour une analyse complète des hypothèses ONU sur les taux de fertilité futurs.

vieillissement et de l'âge des retraites qui sous-tendent les trajectoires globales. Enfin, les liens entre démographie et trajectoire économique ne sont que très rarement explicités, ou bien traités uniquement via les récits en amont des scénarios (exemple des SRES). Il y a là une piste de progrès pour la cohérence interne des scénarios, mais nous ne l'aborderons pas au cours de cette thèse.

Venons-en maintenant à la **question de la croissance future de la productivité.** Deux pratiques coexistent pour prescrire cette évolution exogène : soit une trajectoire directe de croissance de la productivité (soit productivité du travail soit PGF) dont découle ensuite la trajectoire de croissance, ou bien au contraire un « calibrage inverse » réalisé de manière à reconstituer une trajectoire exogène de PIB effectif. En fait, il semble – ce diagnostic mérite une mise au conditionnel parce que ces modalités de calibrage des trajectoires de croissance ne sont pas toujours claires dans la présentation des modèles dans la littérature – que la majorité des modélisateurs utilisant des modèles récursifs fixent la croissance de PIB qu'ils veulent représenter et en déduisent par calibrage inverse les hypothèses de productivité nécessaires pour obtenir la croissance voulue. Le défaut essentiel de cette méthode est que le seul critère de validité des scénarios ainsi calculés est de ne pas être trop différent des projections courantes déjà publiées, sans qu'il y ait à notre connaissance, de validation *ex post* des trajectoires de productivité reconstituées par le calibrage inverse. Rares sont les auteurs ayant pris soin de revenir aux fondamentaux de la théorie de la convergence pour reconsidérer leurs hypothèses de croissance à cette occasion : nous n'avons trouvé que McKibbin et al. (2007) qui adoptent le raisonnement « dans le bon sens », en choisissant de définir des hypothèses plausibles de croissance de la productivité au niveau sectoriel et d'en déduire la croissance endogène au modèle *G-Cubed*.

Quelle que soit la méthode de calibrage, la seule ligne directrice des projections de long terme, lorsqu'elles ne sont pas tout simplement arbitraires ou calées sur des projections exogènes, est l'idée d'une *convergence* ou d'un *rattrapage* entre pays industrialisés et pays en voie de développement. La récente controverse « ppp vs. mer » sur les trajectoires de croissance des scénarios SRES a renouvelé l'attention portée par les modélisateurs sur ces hypothèses de convergence, mais la majeure partie des débats s'est focalisée sur la question de la pertinence des indicateurs en *parité de pouvoir d'achat* ou en *taux de change du marché* (Miketa, 2004 ; Nordhaus, 2007) et sur l'effet d'une réévaluation des écarts de richesse actuels en PPP pour les projections des long-terme (Grubler et al., 2004 ; Holtsmark et al., 2004 ; Tol, 2006 parmi de nombreuses contributions), sans revisiter les fondamentaux théoriques et empiriques des concepts de convergence et divergence des économies. De fait, il y a une grande différence persistante entre les connaissances théoriques et empiriques accumulées sur ce sujet, notamment durant la dernière décennie, et leur transposition souvent très simplifiée dans les modèles et les pratiques de projections de la croissance.

Tout d'abord, il faut bien noter que l'existence d'une règle de convergence générale représente un enjeu scientifique de taille pour la représentation de la croissance économique sur le long terme. Dans la réalité, la dynamique générale du « 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 (Malinvaud, 1993b) 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 – et l'intérêt majeur – 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.

La genèse du débat sur la convergence des économies[29] remonte aux théories néoclassiques de la croissance, et à l'interprétation des résultats des modèles de Solow-Swan (récursif) ou Ramsey-Cass-Koopmans (intertemporel)[30]. Ceux-ci, en effet, prédisent que des économies *ayant certaines caractéristiques en commun* devraient converger vers le même niveau absolu de revenu par tête et le même taux de croissance à long terme. Par conséquent, dans la transition vers cet équilibre stationnaire[31], le taux de croissance instantané est d'autant plus élevé que l'écart à combler entre le niveau initial de revenu par tête et le niveau de l'équilibre stationnaire est important. En termes plus simples, les pays pauvres devraient croître plus rapidement que les pays riches. Les tests empiriques de cette hypothèse sur des bases de données internationales et/ou nationales donnèrent des résultats très mitigés : il y a bien convergence au niveau de sous-ensembles économiques relativement cohérents (entre pays de l'OCDE, entre états des Etats-Unis, entre régions d'un même pays) mais pas au niveau mondial (où l'écart entre les riches et les pauvres s'est accru). Ce résultat a donné lieu à trois réactions :

- **La distinction entre convergence *absolue* et convergence *conditionnelle*** : il s'agit en fait d'une mise au point sur une interprétation simpliste et erronée[32] des résultats des modèles théoriques. Le test de la validité empirique de l'hypothèse de convergence fut considéré dans la littérature comme un test de validité du modèle néoclassique dans son ensemble, et certains détracteurs de ce modèle lui reprochèrent de prédire une convergence *absolue* des économies qui ne se vérifie pas dans les faits. Or le modèle néoclassique ne prévoit qu'une convergence *conditionnelle*, c'est-à-dire <u>seulement</u> lorsque certaines caractéristiques des économies considérées sont identiques (taux de croissance de la population pour la convergence en *taux*, taux d'épargne, technologies, etc. pour la convergence en *niveau*), une hypothèse qui n'est clairement pas vérifiée sur l'ensemble des pays du monde. En tenant compte de certaines spécificités des économies dans le test économétrique, Barro et Sala-i-Martin (1992) puis Sala-i-Martin (1996) trouvent une convergence conditionnelle robuste à travers plusieurs échantillons de pays ou de régions de pays.

[29] (cf. 'Controversy: On the convergence and Divergence of Growth Rates', dossier paru dans *The Economic Journal*, vol. 106, Juillet 1996)
[30] Selon (Elmslie, 1995), qui offre une rétrospective fort intéressante sur l'histoire de ce débat, la controverse remonte bien plus loin, avec la publication en 1942 par David Hume
[31] On rappelle que dans ces modèles l'équilibre stationnaire est caractérisé par la constance du PIB par unité de travail effectif (égal à la quantité de main d'œuvre multipliée par le progrès technique du capital humain).
[32] 'The Absolute Convergence *Fallacy*' selon (Sala-i-Martin, 1996)

- **La recherche d'arguments théoriques expliquant une divergence des économies** : c'est une des raisons de l'émergence des nouvelles théories de la croissance, ou de la *croissance endogène*. Romer (1986) démontre ainsi que l'existence de rendements croissants et d'externalités sur la croissance conduisent à une divergence des économies : les pays riches disposent des moyens d'entretenir continuellement leur croissance tandis que les pauvres ne peuvent jamais croître assez vite pour diminuer l'écart. D'autres arguments se réfèrent à l'existence de trappes à pauvreté (*poverty traps)* et de convergence « de clubs » lorsque la fonction de production n'est pas convexe et conduit à des équilibres stables multiples (Galor, 1996). Dans ce cas, l'argument de rendements croissants n'est finalement pas indispensable à la divergence des économies.

- **La définition d'autres concepts de « convergence »** pour tenter de cerner la meilleure formulation d'une règle agrégée robuste : Sala-i-Martin (1996) distingue entre *β-convergence*[33] (les pays pauvres croissent plus vite que les pays riches) et *σ-convergence* (la dispersion entre pays se réduit, notion discutée plus tôt par Quah (1993)), mais cette distinction ne semble pas apporter d'enseignement supplémentaire ; Quah (1996) argumente pour une approche distributionnelle qui va plus loin que l'analyse du comportement moyen par régression, et qui permet de mettre en évidence la persistance d'une distribution à deux bosses (*twin-peaks*) compatible avec les concepts de convergence de club ou de trappes à pauvreté, et le constat d'une non convergence absolue.

L'ensemble de ces recherches théoriques et empiriques reste largement trop complexe et sans résultat robuste pour être exploité directement hors du champ des spécialistes, 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 (Ingenue, SRES). Comme la conditionnalité reste difficile à traduire en pratique, on observe dans les faits un glissement silencieux du résultat partiel de Barro et Sala-i-Martin vers un « axiome » de convergence absolue à 2% vers le niveau des Etats-Unis[34].

Pourtant, il existe une littérature très instructive – certainement trop peu exploitée dans les projections de long terme – sur l'analyse des dynamiques de convergence à un niveau plus fin que cette observation des 2% érigée en « règle ». Bernard et Jones (1996a, 1996b) font état du constat décevant que les analyses empiriques des années 80 se sont focalisées sur des indices de productivité agrégés, négligeant la question de la convergence *technologique* pour se concentrer uniquement sur l'accumulation du capital dans le modèle néoclassique, alors que la littérature d'après-guerre avait identifié le rôle central du rattrapage technologique dans le phénomène de convergence (Gerschenkron, 1952 ; Abramovitz, 1986) :

[33] β étant le paramètre de vitesse de convergence vers l'équilibre stationnaire, dépendant de la fonction de production agrégée, du taux de dépréciation, du taux de préférence pure pour le présent, de l'élasticité de l'utilité marginale de la consommation et du taux de croissance de la productivité du travail.

[34] Ces « pertes en ligne » sont un fait récurrent dans les pratiques des modélisateurs : les échos des recherches fondamentales en économie se transforment et deviennent de plus en plus flous dans le processus de transmission du théoricien jusqu'au modélisateur final.

> ‘The debate over convergence has lost its way. From its initial concerns about the paths of output for poorer nations, it has become mired down in a debate about 2% per year convergence rates and their robustness or lack thereof. (…) both sides[35] have remained fixated on the role of capital, either physical or human, in determining long-run outcomes. (…) Almost completely forgotten by the empirical literature is the role of technology. (…) To the extent that the adoption and accumulation of technologies is important for convergence, the empirical convergence literature to date is misguided.’ (Bernard et Jones, 1996b, p 1037)

De nombreuses études se consacrent à l’analyse de l’évolution de la productivité dans des secteurs particuliers, notamment dans le secteur manufacturier (Bernard et Jones, 1996a ; Caree et al., 2000) et le secteur énergétique (Miketa, 2001). Le regret de Bernard et Jones, que nous partageons, est que ces études ne fertilisent pas la réflexion sur la convergence à un niveau global et les projections de long terme des économies. Cho (1994) est un des rares exemples que nous avons pu trouver qui opère la jonction, avec une analyse très intéressante du rôle de l’industrialisation dans le phénomène de rattrapage. Le point de départ de cette analyse est l’identification du profil en « bosse » que l’on observe sur les longues séries de taux de croissance de la productivité, notamment après-guerre pour les pays de l’OCDE (Figure 5). A partir de ce fait stylisé, Cho montre que les facteurs usuels de différenciation des régimes de croissance – démographie, taux d’éducation, ration investissement / PIB – n’expliquent pas le profil d’accélération en bosse. Par contre, en intégrant dans la régression le taux de croissance de la part de l’industrie dans la population active, Cho parvient à une estimation bien plus précise et le rôle de l’industrialisation semble apparaître comme un facteur majeur de convergence au sein des sous-ensembles de pays aujourd’hui développés.

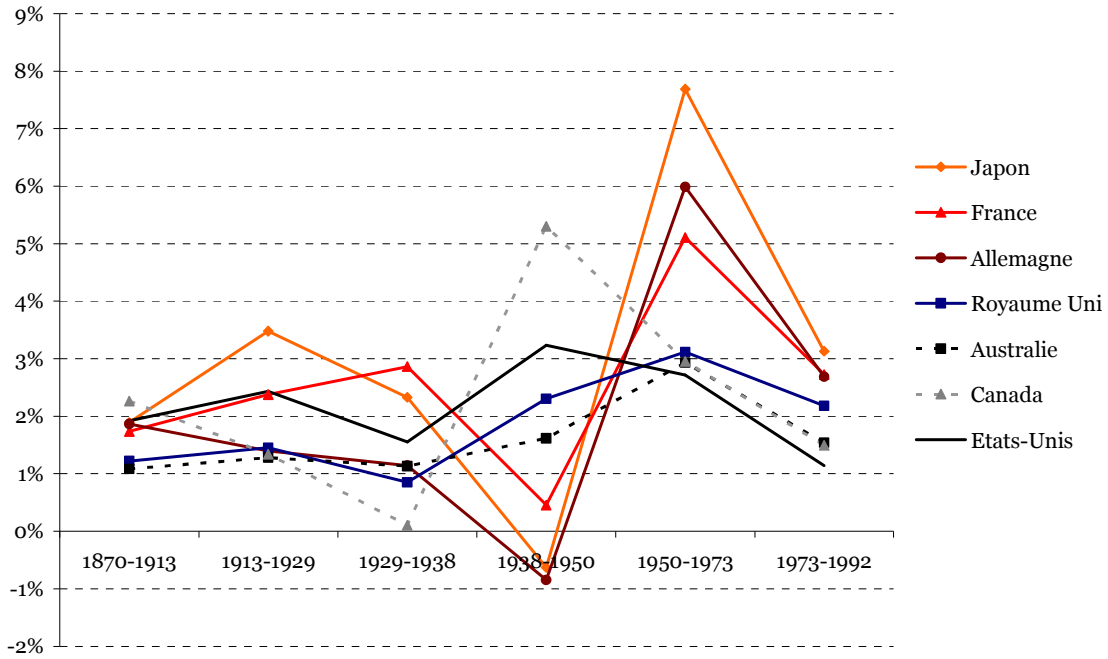


Figure 5 : Taux moyens de productivité horaire
Source des données : Maddison, 2001

[35] Fait allusion aux défenseurs de la « convergence » et à ceux de la « divergence ».

De manière très intéressante, cette dernière approche achève d'éclaircir le débat sur la convergence et de relier plusieurs morceaux de pensée disjoints :

- L'observation d'une convergence au sein de l'OCDE mais d'une divergence globale lorsque l'on inclut les PED ;
- L'idée d'une convergence en 'clubs' chère à Durlauf et Jonhson (1995) et Quah (1996) ;
- L'identification des mécanismes sous-jacents au phénomène de convergence/divergence globale : rattrapage au niveau technologique et changement structurel des économies ;
- L'observation de périodes de une ou deux décennies d'accélération des gains de productivité du travail dans les économies modernes,

La confrontation des pratiques usuelles des projections de long terme avec cet ensemble de travaux théoriques et empiriques fait émerger des pistes d'amélioration des pratiques très claires :

a. Renoncer au « calibrage inverse » des trajectoires de référence pour mieux cerner les incertitudes.

Une réévaluation des intervalles d'incertitudes sur la croissance future est nécessaire, pour pallier à des pratiques qui négligent largement cette question. Cela suppose d'éviter le « calibrage inverse » usuellement pratiqué, en partant des projections consolidées d'évolution des productivités pour générer de manière endogène les trajectoires de croissance, sans postuler *a priori* de fourchettes de trajectoires de PIB *ad hoc*. La croissance effective générée dans un tel processus pourra ainsi incorporer les nombreux mécanismes qui interviennent entre le rattrapage technologique en amont de la croissance et le rattrapage mesuré *ex post* sur la productivité réelle, tel le commerce international, le changement structurel, les investissements cumulés, le degré d'ouverture des secteurs, etc. S'il est effectué au niveau sectoriel, ce positionnement sera aussi un moyen de reconstruire le lien entre les *phénomènes* macroéconomiques de convergence ou de divergence et les *mécanismes* technologiques sectoriels qui génèrent ces phénomènes globaux, en tenant compte des changements de composition des économies**.**

b. Approfondir la représentation des spécificités régionales et sectorielles

C'est le corollaire immédiat du point précédent : la formulation d'hypothèses ou la représentation de mécanismes endogènes de rattrapage technologique et de changement structurel est un procédé beaucoup plus complexe que la prescription d'une trajectoire de PIB de référence *ad hoc*. Un apport d'information significatif est donc nécessaire : quels sont les niveaux de productivité sectoriels actuels ? Quels secteurs sont exposés à la concurrence internationale ? Comment évoluent les parts des biens dans la demande finale ? Quels sont les autres mécanismes de changement structurel, comme la spécialisation indienne dans les services et chinoise dans les produits manufacturés ? Quelles sont les externalités nationales liées à des dynamiques transversales concernant l'éducation, la santé ou les infrastructures ? Un processus de construction de scénarios au niveau international, tel que celui des SRES encadré par le GIEC, devrait permettre de rassembler une telle expertise et d'affiner les projections.

c. Privilégier une représentation physique du monde économique et des technologies

L'ambition décrite ci-dessus a une contrepartie méthodologique qui concerne le design des modèles. Les mesures usuelles de la productivité sont généralement effectuées en termes monétaires, puisqu'à un niveau agrégé, la monnaie est le dénominateur commun permettant d'agréger des secteurs ou des biens différents dans un seul indicateur. Pour pallier à l'écart entre l'image monétaire et l'image physique de la technologie, on a habituellement recours à des indices

de prix, tels que l'indice des parités de pouvoir d'achat, qui permettent de se rapprocher de la vraie taille des grandeurs physiques. Au niveau sectoriel, il est nécessaire et possible d'affiner les variables des modèles censées représenter la productivité et les technologies en général, en recourant le plus souvent possible à une représentation physique des biens produits. C'est à partir de ces grandeurs physiques que la formulation d'hypothèses de convergence sera la plus pertinente.

1.3 Déséquilibres temporaires ou chroniques : la grande lacune des modèles ?

Second volet de la représentation de la croissance économique, la prise en compte des mécanismes de fluctuations de court terme est singulièrement absente des préoccupations des économistes modélisateurs dans le champ de l'énergie et du climat. Les sentiers de croissance économique représentés dans les scénarios de référence ou avec politiques climatiques ou énergétiques sont toujours des sentiers *équilibrés*, pour deux raisons :

(i) Ce sont les modèles théoriques de la croissance de long terme (le modèle récursif de Solow-Swan et le modèle intertemporel de Ramsey-Cass-Koopmans) qui ont été mobilisés et incorporés dans les outils de prospective et ces modèles sont fondés sur une vision « équilibrée » des sentiers de croissance, tant dans le dessein originel de leur créateur (Solow cherchait à pallier les instabilités du modèle Harrod-Domar, Ramsey cherchait la trajectoire d'accumulation optimale) que dans leur utilisation économétrique (les fluctuations étant intégrées soit dans le résidu inexpliqué du changement technique soit dans un bruit blanc). Ces modèles n'incorporent aucun déséquilibre, ni transitoire ni chronique, sur l'utilisation de la force de travail ou des capacités installées.

(ii) Les modélisateurs du long terme ont l'habitude de fonder leurs simulations sur des hypothèses régulières sans heurt, en argumentant que les fluctuations de court terme n'affectent pas les tendances de long terme ; cela ne laisse aucune place aux possibles instabilités ou blocages observés dans la réalité concernant les marchés énergétiques, les difficultés de développement des pays les moins avancés, les déséquilibres extérieurs chroniques, ou encore le poids des dettes nationales.

Cette approche est en général acceptable pour projeter les intervalles d'incertitude des émissions à long terme, à partir des incertitudes en amont sur les déterminants économiques et techniques des trajectoires futures. Mais elle nous semble par contre trop limitante pour l'évaluation des *politiques* climatiques ou énergétiques, parce qu'elle conduit d'une part à **négliger les effets de court terme des chocs** le long de la trajectoire, d'autre part à **rester peu crédibles sur l'évaluation des coûts de transition** des politiques de réduction des émissions à court terme.

En ce qui concerne le premier point, nous pouvons citer deux types de chocs dont on conviendra qu'ils ne sont pas anodins par les coûts qu'ils infligent à l'économie :

- Les chocs possibles sur les marchés de l'énergie, par une flambée directe des prix, ou par une insuffisance de l'approvisionnement ; les exemples les plus évidents sont les chocs pétroliers de 1973, 1979, et les phases de croissance rapide des prix comme en 1990 ou entre 2004 et 2008.

- Des événements climatiques extrêmes – sécheresses, inondations, tornades – dont la taille est suffisante pour déstabiliser une économie nationale ou régionale, comme les inondations liées à l'ouragan Katrina à la Nouvelle Orléans en 2005 ou l'Ouragan Mitch au Honduras en 1998.

Il est crucial de pouvoir représenter ce type de chocs et les réactions d'ajustement qu'ils provoquent dans l'économie, parce que les politiques énergétiques ou climatiques visent précisément à minimiser les risques liés aux deux premiers types de chocs : recherche d'une plus grande indépendance ou frugalité énergétique, réduction des émissions de GES pour limiter le changement climatique, mesures d'adaptation préventive face aux événements climatiques. Du point de vue de l'analyse coûts-bénéfices des politiques éventuelles, les bénéfices des chocs évités, ou dont la propagation dans l'économie est atténuée grâce à ces politiques, peuvent représenter une part significative des gains totaux. Les négliger conduit par exemple à conclure que le changement climatique ne menace que quelques pourcents de PIB à un horizon de plusieurs décennies alors que de nombreux chocs successifs peuvent entraîner une amplification des pertes de manière significative (Ambrosi, 2004). Par ailleurs, *politiquement*, c'est une erreur de ne proposer comme aide à la décision qu'une vision de long terme qui nivelle les fluctuations de court terme. Les cycles politiques courts et l'existence plus ou moins explicite d'un mandat électoral pour une croissance *stable* sont des facteurs importants pour le choix de politiques visant à rendre l'économie moins vulnérable aux chocs externes.

Il est fréquent de rencontrer l'argument selon lequel on peut négliger les variations d'activité entraînées par ces chocs autour de la croissance d'équilibre car elles n'affectent en principe qu'une petite partie de l'activité économique et sont rapidement absorbées dans l'économie. La facture pétrolière ou les secteurs vulnérables au changement climatique telle l'agriculture ne comptent en effet que pour quelques pourcents du PIB, donc l'impact d'un choc, même important, sur ces faibles portions de l'économie resterait négligeable[36]. Cet argument de comptabilité statique ne résiste guère à l'observation des faits économiques réels, qui révèle au contraire de larges effets de propagation dans tout le reste de l'activité économique.

Il existe par exemple une littérature très importante sur **l'impact macroéconomique des chocs pétroliers**[37], selon trois axes méthodologiques (Jones et Leiby, 1996) :

- L'estimation économétrique des effets *durables* d'un choc *permanent* sur le prix du pétrole, en utilisant des modèles de croissance à un seul bien et avec plein emploi des facteurs de production ; ces travaux négligent les mécanismes de propagation et d'ajustement de court terme et fournissent en fait une borne inférieure du coût des chocs pétroliers, en représentant un déplacement sans frictions d'un optimum à l'autre le long de la frontière de production.

- La simulation des ajustements de court et long terme à un choc pétrolier, grâce à des modèles macroéconométriques adaptés pour intégrer le facteur énergie et permettant de décrire certains mécanismes d'ajustements via le marché du travail par exemple : le groupe de travail EMF-7 (Energy Modelling Forum Study Group 7, Hickmans et al., 1987) conclut que la plus grosse partie des pertes d'activité est liée à l'ajustement des marchés de l'emploi et des autres facteurs de

[36] Comme par exemple (Tobin, 1980), cité par (Jones et Leiby, 1996).
[37] On trouvera trois revues complètes successives dans (Mork, 1994), (Jones et Laiby, 1996), (Jones et al., 2004)

production, à cause du chômage supplémentaire et d'une moindre utilisation des capacités installées :

> "An important EMF study conclusion is that, of the GNP losses, the potential (full employment) losses typically comprise only a small fraction, while the dominant losses appear to be the 'cyclical' losses (…), where actual output is reduced more than potential output due to labor and other factors unemployment" (EMF-7 Working Group, 1987, p. 21).[38]

- L'estimation économétrique de la contribution des variations de prix du pétrole aux cycles économiques (*real business cycles*), pour tenter de dissocier la part des chocs pétroliers dans les récessions des autres facteurs de récession éventuels (conditions préexistantes d'inflation, politiques d'ajustement monétaires, etc.).

Il est notable que cette littérature abondante n'a eu que peu d'incidence sur la conception des modèles de prospective à long terme et la représentation des effets d'ajustements de court terme. D'un côté les quelques travaux traitant du sujet des chocs pétroliers à partir de modèles de prospective tombent dans la première des trois situations ci-dessus : ils ne représentent pas les mécanismes d'inertie et d'ajustement qui semblent être les principaux déterminants des pertes liées aux chocs pétroliers, comme les paradigmes théoriques de représentation de la croissance de long terme sur lesquels ils sont fondés, et dont le succès tient justement en partie à leurs propriétés de stabilité. De l'autre côté, les deux autres méthodes d'investigation citées ci-dessus sont économétriques et se prêtent mal à une extrapolation générale des mécanismes sous-jacents.

Pour **la question des dommages climatiques**, c'est à partir d'un diagnostic similaire sur l'absence d'outils adaptés à l'analyse des effets de propagation des chocs que Hallegatte (2005) a développé une approche originale avec le modèle NeDym, inspiré notamment des travaux de Kalecki sur les délais d'investissements. Ce modèle dynamique compact réconcilie un comportement « à la Solow » sur le long terme avec des effets d'ajustement de court terme sur les investissements et le marché de l'emploi. Les travaux d'évaluation des conséquences *dynamiques* des événements extrêmes sur une économie montre toute la richesse potentielle de cette approche (Hallegatte et al., 2007), notamment en permettant de reconstituer des états de récession chronique au-delà d'un seuil de dommages (situation semblable aux difficultés de reconstruction du Honduras) ou de résilience rapide, en fonction des conditions économiques préexistantes.

Plus généralement, l'étude des cycles et des déséquilibres a généré un important corpus de travaux sur lequel il serait possible de s'appuyer. Face à l'existence cyclique ou permanent de chômage et de sous-emploi des capacités, certains économistes se sont concentrés sur les mécanismes d'ajustement ou de non-ajustement qui peuvent les expliquer. C'est le cas de M. Kalecki (1939), J. M. Keynes (1936), N. Kaldor (1940), ou encore Goodwin (1951), qui ont cherché à expliquer les cycles d'activité ou les crises observés dans l'économie réelle – la crise de 1929 étant à l'origine d'une partie importante de ces questionnements – et à développer une expertise macroéconomique valable à court ou moyen terme. Pour cela, ces économistes ont poussé leurs investigations vers des mécanismes différents : des non-linéarités (Kaldor, Goodwin), le rôle de la monnaie et le crédit (Keynes), les délais d'investissements (Kalecki) ou encore des anticipations imparfaites (Hicks, 1939).

Mais l'effort à réaliser pour améliorer la représentation du court terme dans les modèles de prospective énergie-climat n'est pas seulement un alignement nécessaire sur les connaissances

[38] Cité par (Jones et Leiby, 1996).

théoriques ou empiriques accumulées dans d'autres spécialités de science économique, comme c'était le cas pour la représentation du progrès technique ou du rattrapage. Ici, l'enjeu est très ambitieux puisqu'il consiste à tenter ce rapprochement que Solow (2000) appelait de ces vœux entre croissance néoclassique sur le long terme et mécanismes keynésiens à court terme. Les deux approches qu'il s'agit d'intégrer sont à la fois complémentaires et difficilement réconciliables :

- D'une part, leur *complémentarité* vient clairement du fait qu'elles débouchent chacune sur une représentation éclairante mais totalement différente sur la croissance économique : d'un côté le fonctionnement pérenne des économies sur de longues périodes de plusieurs décennies, de l'autre les variations et déséquilibres caractéristiques des dynamiques de croissance à plus court terme. Très schématiquement, la Figure 6 illustre les deux points de vue : la question du fonctionnement et de la pérennité de la croissance à long terme est l'étude du graphe supérieur (qu'il est possible d'approcher par une courbe exponentielle régulière avec un coefficient de détermination de 0.9934 !) tandis que l'examen des déséquilibres de court terme vise plutôt la compréhension des mécanismes à l'œuvre derrière le second graphe, qui montre une grande variabilité du taux de croissance annuel. Il s'agit pourtant de la même réalité économique.

- D'autre part, la difficulté de réconcilier les deux approches vient de la formulation « opposée » de leurs objectifs scientifiques : l'étude des trajectoires à long terme se focalise sur les régimes stationnaires et les conditions de leur stabilité, tandis que les économistes keynésiens ont cherché à comprendre les mécanismes de déséquilibre, d'ajustement ou de non ajustement qui expliquent les cycles de l'activité économique sur des pas de temps plus courts, les crises économiques et le sous-emploi des facteurs de production.

Solow (2000) nous fournit un exemple frappant des difficultés à faire dialoguer les deux approches :

> "In a sharp review of James Tobin's *Asset Accumulation and Economic Activity* (1980) he insisted, as I remember, that any attempt to be "Keynesian" in the short run and"neoclassical" in the long run is simply illogical. I can see what he meant. How does someone who is being Keynesian from quarter to quarter ever stop? How does someone who is being neoclassical ever find room for a fixed-price interlude when markets do not clear?" (pp. 157-158)

Mais quelques lignes plus bas, il fournit sa propre vision imagée de cette dichotomie, proche de notre illustration graphique ci-contre :

> "When I walk around Boston or sail around Vineyard Sound I navigate without hesitation as if the earth were flat, and I get there just fine. If I were flying to Timbuktu or sailing to Sydney, I would surely navigate as if the earth were spherical. The analogy is not perfect. Here is a rather better one that I understand less well: in everyday life, I am assured, Newtonian physics is perfectly adequate, but over much longer distances and higher velocities it would be a bad mistake to omit relativistic effects. Presumably there are intermediate velocities at which the choice might be worth thinking about." (p. 158)

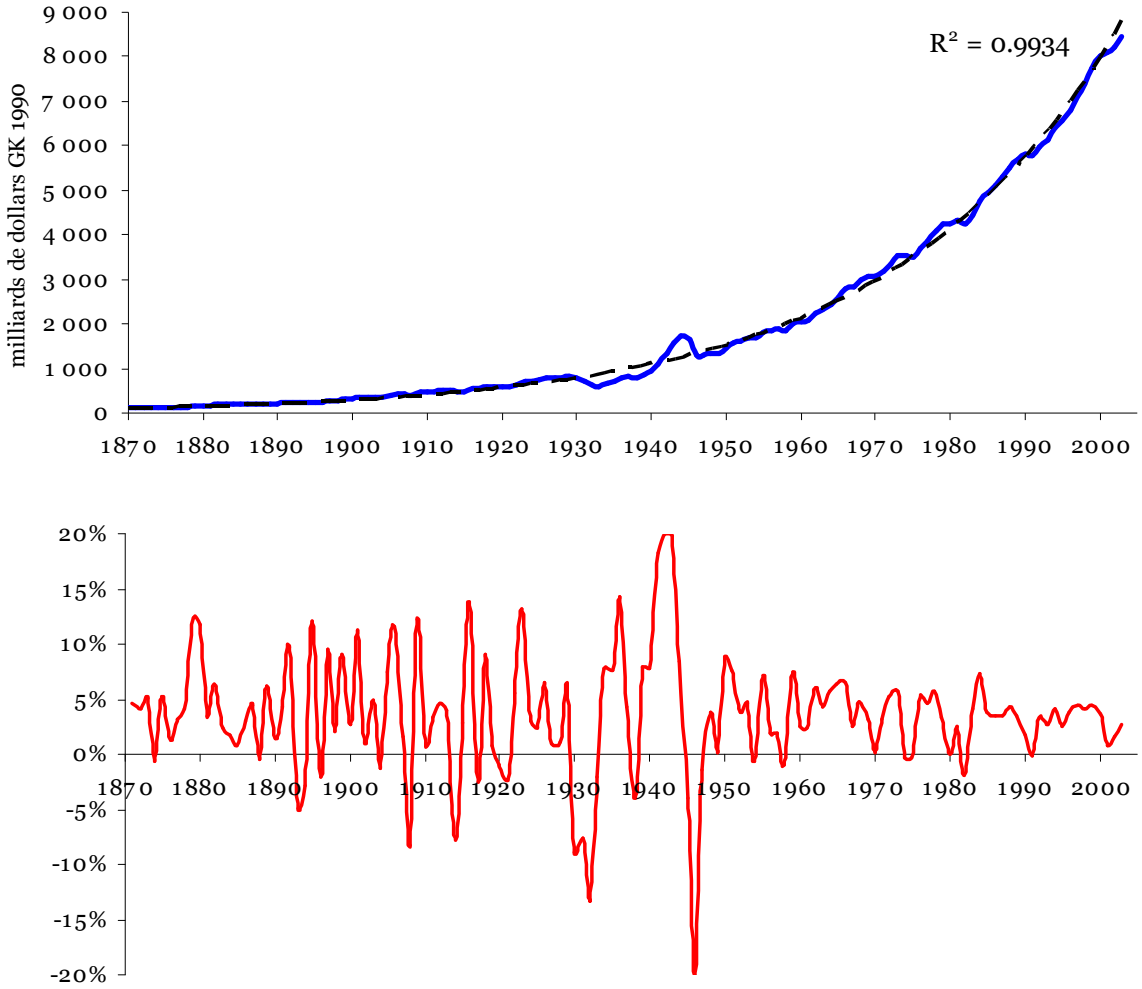


Figure 6 : Croissance économique de long-terme – deux points de vue différents
a. PIB réel des Etats-Unis, Dollars Geary-Khamis International 1990.
b. Taux de croissance du PIB réel des Etats-Unis, données identiques.
Données : (Maddison, 2003)

Il existe néanmoins un certain nombre de pistes pour disposer d'un cadre de pensée satisfaisant pour envisager à la fois les tendances de long terme et les fluctuations possibles à court terme. Sans être exhaustif, nous pouvons souligner par exemple les travaux de *J. Hicks* (utilisation de l'équilibre général statique dans un processus séquentiel, Hicks, 1939 ; théorie de la traverse temporelle, Hicks, 1973 ; concepts *flexprice* et *fixprice*, Hicks, 1965), *N. Kaldor* (cycles endogènes, Kaldor, 1940), *J. Robinson* (extension du modèle de Kalecki sur le long terme, Robinson, 1956), *L. Johansen* (fonction de production *putty-clay* et inertie, Johansen, 1959) ou encore *E. Malinvaud* (sentiers de croissance avec rigidité des salaires, Malinvaud, 1977). Tous ont en commun d'avoir mis l'accent sur une représentation séquentielle des trajectoires de long terme comme succession d'équilibres parfois partiels, de transitions ou de déséquilibres à court terme. Solow (2000) nous livre son verdict sur ces développements en jugeant que la jonction théorique entre la macroéconomie de court terme et celle du long terme n'est pas encore réalisée, tout en reconnaissant les progrès réalisés vers cet objectif, notamment du côté de l'étude des fluctuations cycliques.

Il faut noter que, dans un certain nombre de ces tentatives, la représentation des fluctuations et des ajustements de court terme passe par l'abandon de certaines d'hypothèses d'optimalité,

d'anticipations parfaites ou de mobilité instantanée des facteurs. En fait, c'est ici qu'affleurent les liens étroits entre la représentation du phénomène de croissance et celle des univers techniques, comme nous allons le voir dans la partie suivante.

2 La représentation des systèmes techniques

Le second volet de notre diagnostic sur l'état de l'art de la modélisation prospective se rapporte à la description des techniques et à leur évolution le long des trajectoires de croissance. En traitant ce sujet comme une partie disjointe du diagnostic sur les modes de représentation de la croissance que nous venons de dresser dans la première partie de ce chapitre, nous prenons le risque de laisser entendre au lecteur que ce sont là deux sujets indépendants. Or, on ne peut analyser indépendamment la croissance quantitative des économies d'une part et leur contenu technique et matériel d'autre part. En effet, comme nous l'avons montré dans le paragraphe 1.2 à propos de la formulation des hypothèses de rattrapage, le traitement purement macroéconomique et monétaire du moteur de la croissance n'est qu'un moyen d'encapsuler dans une forme compacte la dynamique globale résultant des mécanismes multiples en jeu dans la croissance économique, notamment l'évolution simultanée des systèmes techniques. Les pistes de recherche esquissées en conclusion du paragraphe 1.2 sont d'ailleurs explicites : les méthodes économétriques appliquées à un niveau très agrégé ne permettent pas de déterminer quelles sont les hypothèses les plus plausibles – convergence ou divergence – à adopter pour les trajectoires futures. Il est souhaitable de descendre à un niveau d'agrégation plus détaillé pour expliciter les mécanismes sectoriels pouvant justifier l'une ou l'autre des hypothèses globales et cette désagrégation nous ramène au problème de la représentation des systèmes techniques et de leur évolution.

En sus de cette observation *générale* – elle concerne toute projection de croissance sur le long terme – il nous faut préciser que la nature même des préoccupations énergétiques, climatiques ou de toute autre problématique de ressources et de développement durable (eau, biodiversité, sols, santé, etc.) impose de représenter explicitement le monde physique sous-jacent à tout sentier de croissance future. Le changement climatique est une question de tonnes de gaz à effet de serre, qui dépendent elles-mêmes des tonnes d'acier ou de ciment produites, des voyageur-kilomètres parcourus, des tonnes de charbon, de gaz et de pétrole brûlées, des hectares de forêts dévastés, etc. La contrepartie de ce monde « physique » dans la sphère « monétaire » s'obtient via le jeu des prix relatifs et par la médiation des monnaies (sauf dans le cas des externalités), dont les variations sont en général régies par des mécanismes de marché et de régulation économique. Sans une explicitation simultanée du monde physique et de son « image » monétaire, il est impossible de représenter les interactions des changements de prix relatifs et de revenus d'un côté et de la base matérielle de la croissance – technologies, demande finale – de l'autre, à un niveau suffisamment détaillé pour décrire la chaîne des déterminants entre activité économique et émissions.

Cette représentation duale est précisément la ligne de fracture entre modèles technico-économiques et modèles macroéconomiques, comme nous l'avons mis en évidence dans le précédent chapitre en revenant sur la chronologie du développement des modèles. Le clivage entre les deux approches va bien au-delà d'une simple difficulté de dialogue entre deux approches « disciplinaires » opposées, il établit une jonction continue entre **un dossier théorique encore irrésolu** – la représentation des possibilités techniques – avec **une demande forte de résultats** du côté de l'expertise – dans la terminologie du GIEC, l'évaluation des *potentiels de réduction* dans les différents secteurs de l'économie et l'analyse *des barrières* à la réalisation de ces potentiels. Dans l'état actuel des diverses méthodes de modélisation, les décideurs sont confrontés à des intervalles d'incertitude

très larges et peu éclairants sur ces potentiels. Pour améliorer la qualité et l'utilité du diagnostic scientifique, il faut franchir une étape supplémentaire de *validation* des potentiels « techniques » pré-identifiés selon des approches « bottom-up » dans une représentation globale des économies réelles et imparfaites. Pour cela, nous pensons utile d'effectuer un retour en amont sur les bases théoriques de la ligne de fracture entre les modèles, afin de disposer d'éléments de clarification sur le cahier des charges d'une modélisation hybride à même de nous faire franchir cette étape supplémentaire.

2.1 Les enjeux du clivage historique « bottom-up » vs. « top-down »

La persistance de ce clivage entre modèles est directement liée à l'existence historique de deux « chapelles » de modélisation et à la difficulté d'harmoniser les *credo* de chaque approche. En réalité, dès l'origine, les fondations de chacun des deux programmes scientifiques incarnent des visions totalement différentes du monde économique et technique :

- **L'approche technico-économique** est fondée sur une vision partielle de l'économie, puisqu'elle se focalise uniquement sur le système énergétique, de la production d'énergie primaire à la fourniture de services énergétiques finaux, le reste de l'économie n'étant représenté qu'en tant que consommateur final de ces services. La représentation du système énergétique consiste d'abord en une énumération la plus exhaustive possible des technologies existantes et de leurs caractéristiques (coûts, rendements, capacités installées), avec des degrés d'agrégation variables selon les modèles, pouvant atteindre une grande précision (par exemple 280 technologies d'usage finaux dans AIM/EndUse, Shukla et al., 2003). Il s'agit d'une information tangible, exprimée en unités physiques, discutable et aisément vérifiable auprès des ingénieurs énergéticiens. A partir de la description exhaustive des technologies disponibles ou potentiellement disponibles à un certain horizon, les modèles technico-économiques représentent l'évolution du système énergétique et éventuellement des marchés énergétiques. Cette évolution résulte soit d'une stratégie d'optimisation (modèles de la famille MARKAL ou GLOBAL 2100) ou bien des règles de comportement des agents intervenant dans le système énergétique (modèles de simulation de la famille Edmonds-Reilly).

- **L'approche macroéconomique** est fondée sur une vision globale de l'économie, à un degré d'agrégation élevé, pouvant aller d'un bien unique (modèle DICE) à plusieurs dizaines de secteurs productifs (par exemple 16 secteurs dans EPPA v4, 12 dans G-Cubed, 14 dans GEMINI-E3, plus de 200 dans AMIGA). Dans un modèle « top-down » (type GREEN ou DICE), l'activité économique est décrite à chaque instant *t* par une fonction de production, globale ou pour chaque secteur, reliant la production Y aux quantités de facteurs de production utilisées K (capital), L (travail), E (énergie) et M (biens intermédiaires) :

$$Y_t = f_t(K_t, L_t, E_t, M_t) \tag{2.1}$$

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. Les technologies existantes dans chaque secteur ou dans l'économie toute entière sont donc décrites d'une manière abstraite à travers cet ensemble de combinaisons possibles. Cette approche peut être interprétée comme une dérive de l'utilisation par Solow (1988) d'une telle fonction au niveau agrégé, alors qu'il mettait en garde lui-même sur l'interprétation « technique » de sa fonction agrégée :

> "This 'Wrinkle' is acceptable only at an aggregate level (for specific purposes) and implies to be cautious about the interpretation of the macroeconomic production functions as referring to a specific technical content."

Dans les modèles « top-down » actuels, la forme mathématique et le paramétrage des fonctions de production sont considérés comme des moyens de décrire différentes possibilités de substitutions entre les facteurs. La complexité de ces fonctions est très variable :

- ***Dans le modèle compact DICE***, l'économie est résumée par une fonction Cobb-Douglas :

$$Y_t = \Omega_t \cdot A_t \cdot K_t^{\gamma} \cdot L_t^{1-\gamma} \tag{2.2}$$

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. L'utilisation d'une telle fonction pour décrire l'ensemble des possibilités techniques d'une économie découle directement de l'approche adoptée par Solow (1955, 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." (Solow, 1988, p. 308)

- ***Dans les modèles multisectoriels***, de type GREEN, 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 7 relative au modèle EPPA. Dans l'arbre de cette figure, on distingue :

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

(ii) les nœuds « 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.

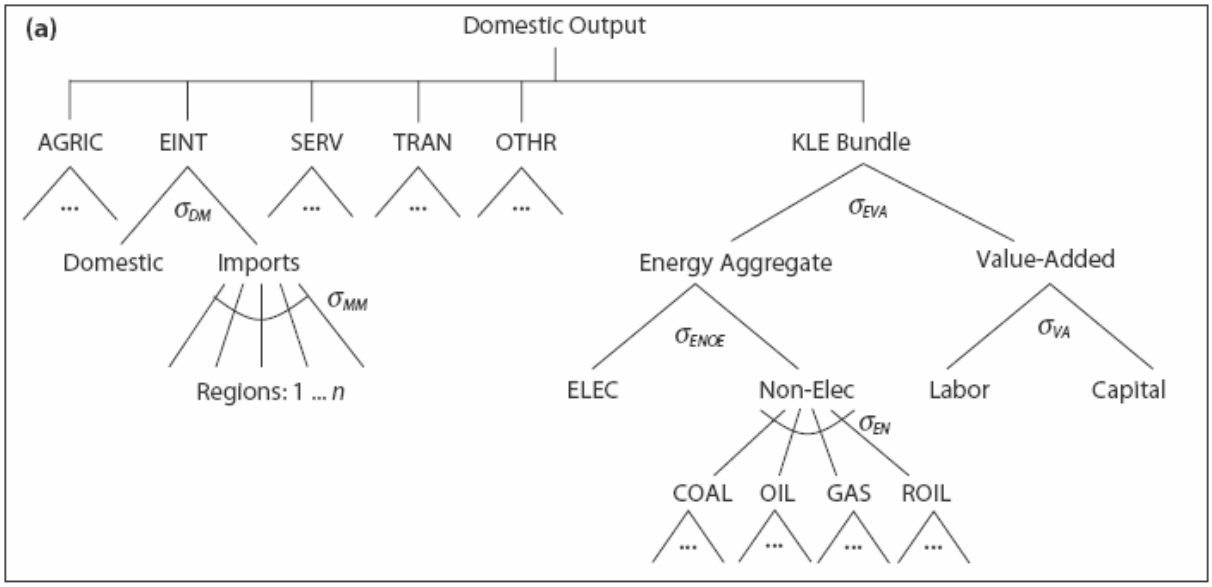


Figure 7 : structure de production des secteurs Industries et Services dans EPPA 4 (Paltsev. et al. 2005)

En théorie, les deux approches ne sont pas incompatibles, puisqu'elles se focalisent sur des niveaux d'agrégation différents. Plusieurs auteurs ont tenté d'apporter des éclaircissements théoriques sur une réconciliation générale des niveaux micro et macro (voir par exemple Lévy-Garboua et Denizot, 1972 ; Malinvaud, 2002). Une des contributions les plus éclairantes concernant les fonctions de production nous semble être celle de Leif Johansen (1972), parce qu'elle opère une jonction à la fois théorique, empirique et opérationnelle des deux approches. Johansen (1972, ch. 2) distingue quatre types de fonctions de production, d'abord selon le niveau d'agrégation concerné – micro ou macro – et ensuite selon le point de vue temporel considéré – à court terme ou à long terme. En se limitant tout d'abord à la dimension micro-macro, il démontre comment le procédé d'agrégation d'unités de production multiples est susceptible d'opérer la transformation de fonctions de production linéaires à coefficients constants en une fonction de production à facteurs substituables. Il analyse ensuite la différence de flexibilité entre les fonctions à court terme et à long terme, posant les bases du modèle « putty-clay » très utilisé depuis et répondant par là à un questionnement central de Solow sur le caractère *incorporé* de la technologie et sur les insuffisances de son propre modèle en la matière. Ces travaux théoriques et empiriques – Leif Johansen complète sa démonstration par un cas d'étude sur le secteur du transport maritime en Norvège – fournissent une approche efficace pour réconcilier les approches bottom-up et top-down, approche que nous avons essayé de reprendre à notre compte dans la justification du modèle Imaclim-R dans les chapitres suivants.

Pour comprendre à quel point la coexistence des deux approches constitue l'un des obstacles principaux à leur fertilisation réciproque, on peut revenir à l'exemple de la Figure 7 ci-dessus. Supposons qu'il y ait, dans un secteur donné, une substitution de source énergétique du pétrole au gaz suite à une hausse du prix du pétrole. Dans un modèle « bottom-up », cette substitution sera représentée via un changement de technologie et le ratio de substitution pétrole-gaz (nombre d'unités de gaz en plus pour remplacer une unité de pétrole qui n'est plus consommée) va dépendre uniquement des rendements relatifs de transformation du pétrole et du gaz en service énergétique final. Dans le modèle « top-down » schématisé ci-dessus, la substitution va s'opérer avec une élasticité de substitution σ_{EN} constante, reliant les *pourcentages* d'augmentation du gaz consommé et de diminution du pétrole consommé aux variations des prix relatifs, si bien que le ratio de substitution *en quantité* dépendra des parts initiales de pétrole et de gaz dans le mix énergétique du secteur, ce qui semble

aberrant du point de vue des technologies censées sous-tendre une telle substitution. Nous nous trouvons ici dans un cas où les deux types de représentation des technologies semblent irréconciliables. Cet artefact a été pointé plus généralement par Frondel et Schmidt (2002) à partir d'une revue systématique des évaluations d'élasticité capital-énergie pour le calibrage des fonctions de production agrégées :

> "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" (Frondel and Schmidt, 2002, p.72)

En fait, probablement plus préoccupés par la nécessité de produire des résultats avec les modèles dont ils disposent, mais aussi marqués par leurs propres réflexes intellectuels, les protagonistes des deux « modelling tribes » n'ont pas prêté beaucoup d'attention au fait que derrière la difficulté d'établir un dialogue entre les deux modes de représentation des technologies, ressurgissaient des éléments de la controverse théorique « des deux Cambridge ». Cette controverse, qui s'étendit du milieu des années 50 au début des années 70, opposait les économistes de Cambridge, UK (notamment Joan Robinson, Sraffa, Pasinetti, Garegnani, Champernowne,) et ceux de Cambridge, USA (Samuelson, Solow, Hahn, Bliss), avec des débats « à tiroirs » sur la représentation des itinéraires techniques et des choix de production. Cohen et Harcourt (2003) resituent le point de départ de cette controverse à la publication de l'article « The Production Function and The Theory of Capital » de Joan Robinson en 1954. Joan Robinson y attaque avec passion la vision néoclassique de la fonction de production et de son utilisation « à l'optimum » avec l'argument qu'elle implique une vision erronée de la réalité économique. Le malaise des Cambridgiens anglais se décline selon plusieurs axes :

- Le caractère abstrait et indéfini du concept de capital utilisé dans la fonction de production néoclassique, et par conséquence les problèmes de mesure de ce capital ;

- Le lien automatique entre les propriétés techniques de l'appareil de production (représentées par les ratios des facteurs de production) et la distribution du revenu entre capitalistes et travailleurs à l'optimum ;

- L'impossibilité de rendre compte, avec une fonction de production néoclassique de type (2.2), de phénomènes comme le retour des techniques[39] (*reswitching*) ;

- A un niveau plus global, l'inadéquation du cadre de l'équilibre statique ou de l'équilibre stationnaire pour décrire le processus de croissance et d'accumulation.

Malgré des débats animés pendant deux décennies, toutes ces questions n'ont pas trouvé de solution consensuelle. Si une partie importante des critiques adressées à la théorie néoclassique par les cambridgiens anglais a été reconnue comme pertinente et importante, on ne peut que constater que le paradigme néoclassique a résisté à cette attaque intellectuelle et s'est maintenu comme paradigme dominant. La première raison de cette apparente « victoire » semble être l'absence de proposition crédible et opérationnelle pour fournir une alternative à la fonction de production agrégée :

[39] Le retour des techniques est la possibilité qu'il existe une technique plus profitable pour des taux d'intérêt élevés ou faibles et une autre technique privilégiée entre les deux. Cela fait partie des « effets de Wicksell » (Wicksell, 1911 ; Samuelson, 1966 ; cités dans Cohen et Harcourt, 2003).

> « Deux conclusions devraient être claires sur ce qu'il faut dire aujourd'hui de la querelle entre les deux Cambridge, près de trente ans après. D'une part, les formes possibles des contraintes techniques et de leurs répercussions sur le système des prix d'équilibre sont tellement variées que la grande majorité des conjectures relatives à des propriétés générales de statique comparée se sont révélées trompeuses (…). En particulier la déduction logique pure ne peut pas justifier à elle seule la liaison étroite entre agrégats et indices que les fonctions de production agrégées expriment. D'autre part, la critique des fonctions de production s'est avérée totalement inefficace, car elle n'a proposé aucune alternative aux démarches actuelles (…). » (Malinvaud, 1993a)

La seconde raison de cette survie semble être l'effet du temps sur le fond théorique de la controverse : après une période de « convalescence », la résilience du paradigme néoclassique a été alimentée par le dynamisme des nouvelles théories de la croissance et par l'oubli relatif du contenu des controverses passées :

> « The Cambridge controversies, if remembered at all, are usually portrayed today as a tempest in a teapot over anomalies involving the measurement of capital in aggregate production function models, having a little significance for the neoclassical marginal productivity theory of distribution as do Giffen good anomalies for the law of demand. When theories of endogenous growth and real business cycles took off in the 1980s using aggregate production functions, contributors usually wrote as if the controversies had never occurred and the Cambridge, England contributors had never existed (Robinson and Sraffa obliged by dying in 1983). Since neoclassical theory has survived and the challengers have largely disappeared, the usual conclusion is that the "English" Cantabrigians were clearly wrong or wrong-headed." (Cohen et Harcourt, 2003, p. 200)

En fait la difficulté que nous rencontrons dans le domaine énergétique de réconcilier l'approche des fonctions de production agrégées avec la vision des ingénieurs qui disposent des connaissances technologiques fait écho au malaise initial de Joan Robinson : ces fonctions agrégées, aux propriétés mathématiques « arrangeantes » pour la résolution des modèles, forment des « boîtes noires » difficiles à raccorder au contenu physique et technique de l'économie. C'est en particulier le cas de ce que l'on appelle le « capital productif », à propos duquel Joan Robinson faisait remarquer qu'on ne pouvait pas le mesurer sans disposer d'un système de prix relatifs, sauf s'il était homogène, « comme de la gelée ». L'impossible réconciliation dont nous parlons ici devient un obstacle très concret à la projection cohérente des économies et de leur contenu technique, matériel et énergétique. A cause de cela, les différences de représentation des paradigmes « bottom-up » et « top-down » ne se cantonnent pas à un débat méthodologique de spécialistes, mais elles impliquent des perceptions différentes des enjeux de la réduction des émissions de GES, des stratégies d'action et des instruments à mobiliser.

Dans la vision « bottom-up », la nécessité de réduire des émissions de GES est directement traduite en termes d'adoption des technologies plus efficaces et/ou non carbonées pour la satisfaction des mêmes services énergétiques. Dans un cadre « top-down » l'enjeu dépasse le changement technique « pur » car une stratégie de réduction comporte un mélange de changement technique, sous forme de substitutions entre facteurs et de progrès d'efficacité énergétique, de changement structurel, et de contingentement des activités émettrices.

Du point de vue des instruments de mise en œuvre de la stratégie de réduction, ces différences modifient les préconisations dans les deux cas : dans la vision « bottom-up », il s'agit d'orienter les investissements vers les technologies non carbonées et plus efficaces, via des taxes, des subventions, ou des efforts de R&D qui vont modifier l'attractivité relative des options disponibles. Dans la vision « top-down », il s'agit d'internaliser dans le système des prix relatifs la valeur d'une tonne de carbone

émise afin que *l'ensemble de l'économie* s'adapte au coût social de cette tonne émise en substituant, du côté de la demande, les activités peu émettrices aux activités émettrices et, du côté de l'offre, les différents intrants de la production, pour consommer en moindre quantités les biens dont les prix ont le plus augmenté à cause du prix du carbone, à commencer par les énergies fossiles.

Du point de vue des coûts de réduction, l'effet d'un signal-prix du carbone est très différent dans chacun des deux cas. Dans les modèles bottom-up, le coût de réduction est limité au différentiel de coût complet de fourniture du service énergétique lié à la contrainte sur les émissions, en tenant compte de la réduction des capacités de production nécessaires, grâce aux gains d'efficacité du côté de la demande. En général, ce coût net purement « technique » est faible par rapport à l'activité économique globale mesurée par le PIB. Dans les modèles top-down, la propagation de la valeur du carbone dans tout le système des prix relatifs provoque des ajustements dans l'ensemble de l'économie, ce qui laisserait penser que les coûts peuvent être plus élevés. Mais il faut aussi tenir compte du possible bénéfice du recyclage des ressources de la taxe carbone, susceptible de diminuer considérablement le coût net. Au final, les méta-analyses des résultats des modèles montrent que les différences d'évaluations des coûts d'un objectif de réduction donné sont moins liées au type de modèle qui sert à les générer qu'aux hypothèses et paramètres introduits dans le modèle (Hourcade et Robinson, 1996).

Malgré cela, la littérature fait régulièrement allusion à « l'optimisme du paradigme des ingénieurs » contre le « pessimisme des économistes » (GIEC, 1995, §8.4.1). Cette vision est alimentée en particulier par la question de **l'existence des potentiels sans regret**. Un « potentiel sans regret » est une opportunité de changement technologique dont les bénéfices *nets* sont positifs même en dehors de tout changement climatique. Cela peut donc se décliner sous deux formes : *en statique*, lorsqu'il existe un écart (« efficiency gap ») entre le panier technologique qui serait optimal compte tenu des prix courants et le panier des technologies installées ; *en dynamique*, lorsqu'on se réfère à un scénario qui ne correspond pas à un équilibre intertemporel et que la politique carbone est susceptible de remédier à certaines inefficacités[40]. D'un point de vue théorique, ce débat n'est pas lié au clivage bottom-up / top-down dans la description des technologies, mais aux hypothèses d'optimalité incorporées dans les modèles. On peut en effet représenter des potentiels sans regret dans les deux familles de modèle, à partir du moment où l'état initial ou le scénario de référence comportent des sous optimalités. En fait, si l'on revient aux 5 familles de modèles identifiées dans le chapitre 1, il apparaît que les potentiels sans-regrets ne sont représentés que dans la famille Edmonds-Reilly et une partie des modèles de la famille GREEN[41]. Pourtant, dans les débats entre spécialistes, le débat des sans regret s'est aligné sur la ligne de clivage bottom-up / top-down. Cela peut s'expliquer par les visions sous-jacentes aux différents types de modèles : l'intuition *d'ingénieur* des modélisateurs « bottom-up » est qu'il existe de tels potentiels dans la situation courante, l'exemple le plus souvent cité étant les ampoules basse consommation. Au contraire, le réflexe intellectuel des économistes, pour la plupart fidèles à une boîte à outils qui, par défaut, décrit un monde optimal en tous points du temps, est que toute sous optimalité apparente est en fait liée à des imperfections de marché ou des coûts mal

[40] Comme le soulignent Baron et Hourcade (1994), ce concept peut être étendu à une définition plus large de l'écart entre situation présente et situation optimale, sous le vocable « optimality gap », en tenant compte aussi (i) des bénéfices collatéraux de certaines décisions (sur la sécurité énergétique, la qualité de l'environnement local, etc.), (ii) des bénéfices macroéconomiques en cas de réforme fiscale bien conduite.

[41] En fait, l'introduction de rendements croissants dans les modèles d'optimisation, avec la représentation du progrès technique induit, peut générer un nouveau type de « sans regrets », à cause de l'existence de plusieurs optima locaux. Imaginons un cas où le scénario de référence corresponde à un de ces optima, mais pas à l'optimum global. Alors des instruments faisant bifurquer la trajectoire vers l'optimum global peuvent faire apparaître des coûts négatifs.

identifiés : asymétrie d'information, coûts de transaction, coûts intangibles, préférences individuelles, etc. De fait, l'analyse courante dans les approches *bottom-up* est qu'il existe des marges de manœuvre techniques très larges et à des coûts raisonnables pour rendre plus efficace ou décarboniser le système énergétique. A l'opposé, la tendance initiale des modèles *top-down* était vers des coûts plus élevés à cause des mécanismes de rétroaction macroéconomique et de l'effet du fardeau d'une taxe carbone sur les secteurs non-énergétiques (GIEC, 1995, §8.4.3). La modélisation plus fine du recyclage des revenus de la taxe a ensuite conduit à des évaluations plus optimistes, mais le diagnostic initial sur l'optimiste des ingénieurs et le pessimisme des économistes est devenu un cliché résistant.

	Paradigme Bottom-up historique	**Paradigme Top-Down historique**
Forces	▪ Représentation détaillée des technologies et des contraintes techniques ▪ Respect des contraintes physiques ▪ Permet une discussion des paramètres tangibles	▪ Représentation globale de la croissance économique et des effets d'équilibre général ▪ Représentation des comportements de consommation et de production ▪ Prise en compte des effets macroéconomiques des politiques, effets rebonds, recyclages des taxes, etc.
Faiblesses	▪ Vision limitée au secteur énergétique, sans prise en compte des effets de bouclage macroéconomique ▪ Peu de prise en compte des préférences et des comportements (coûts intangibles)	▪ Description optimale et agrégée des comportements ▪ Représentations non tangibles des technologies ▪ Contradiction entre les fonctions de production flexibles et les contraintes techniques et thermodynamiques ▪ Faiblesse empirique des valeurs utilisées pour les paramètres d'élasticités (ESUB[42] par exemple)

Tableau 6 : Forces et faiblesses des paradigmes BU et TD

Le Tableau 6 résume les forces et faiblesses des deux types de modèles. On trouve encore aujourd'hui, dans le paysage des outils utilisés, de nombreux modèles dont la seule évolution par rapport aux paradigmes ci-dessus réside dans une désagrégation et une complexification plus grande. Au contraire, comme nous l'avons mentionné dans le premier chapitre, l'identification claire des insuffisances de part et d'autre a aussi conduit à des tentatives de couplage ou d'hybridation.

Mark Jaccard (2005) énonce de manière éclairante le défi posé aux modélisateurs dans ces efforts d'hybridation : selon lui, l'utilité d'un modèle pour l'aide à la décision dépend de son aptitude à décrire l'économie en tenant compte de trois composantes : (i) la représentation détaillée de l'ensemble discret des technologies disponibles, (ii) les préférences individuelles et la formation des arbitrages, (iii) la prise en compte des effets de système entre politiques énergétiques et le reste de l'économie. La Figure 8, tirée de Hourcade, Jaccard et al. (2006), permet de resituer les paradigmes historiques BU et TD dans cet espace tridimensionnel :

[42] Le paramètre ESUB – Elasticity of Substitution – est le paramètre qui détermine la facilité des substitutions entre différents facteurs de production (énergie, capital, travail, ou énergie carbonée vs. non carbonée). Une valeur élevée de cette élasticité impliquera un coût modéré du changement technique.

- Le paradigme bottom-up historique est surtout orienté selon l'axe de la représentation la plus explicite possible des technologies. Sa capacité à décrire de manière satisfaisante le comportement des agents est variable. Dans le modèle MARKAL, ce comportement est très simple, puisqu'il revient à suivre les recommandations d'un planificateur bienveillant qui minimiserait le coût global du système énergétique. Dans le cas de la famille Edmonds-Reilly, nous disposons d'une description plus sophistiquée, comportant des fonctions de comportement – fonctions de parts, coûts intangibles, etc.

- Le paradigme top-down historique est lui orienté vers la description des effets de système entre secteur énergétique et le reste de l'économie. Par contre, il ne comporte qu'une description très agrégée et peu tangible des technologies. Enfin, il n'offre en général qu'une représentation agrégée des comportements dont le calibrage est souvent peu robuste et dont les « fondations microéconomiques » ne sont que rarement étayées par des analyses empiriques. En général, les modèles top-down existants représentent des agents représentatifs qui optimisent à chaque instant du temps leur comportement, mais ne prennent pas en compte certains signaux et contraintes auxquels les agents réels sont confrontés (prix de l'immobilier, contraintes de budget, coûts d'information et de transaction, inertie des équipements existants), ni la possibilité d'anticipations imparfaites dans certains cas[43].

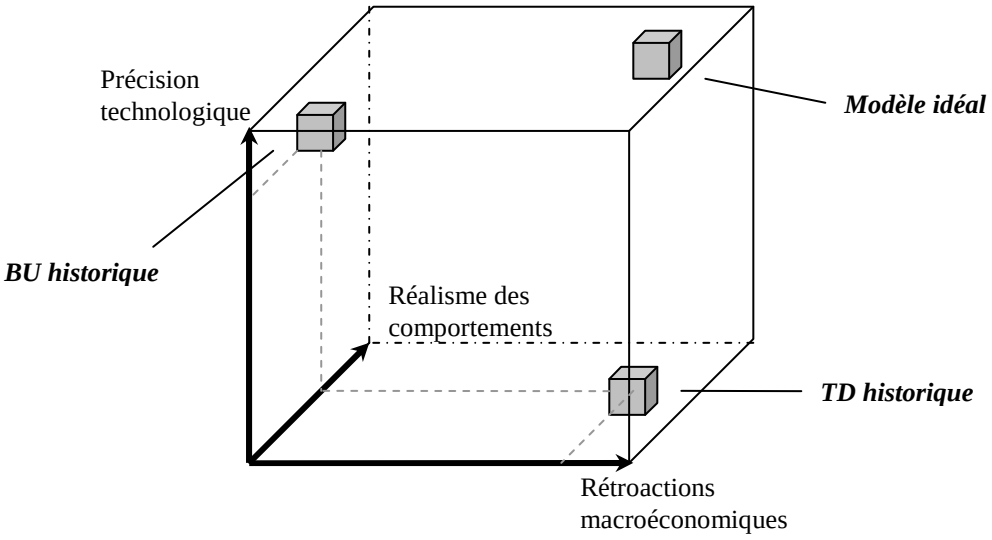


Figure 8 : Evaluation en trois dimensions des modèles énergie-économie

Cette figure laisse entrevoir très clairement les caractéristiques du modèle idéal, sorte « d'attracteur » des démarches d'hybridation : ce modèle idéal est celui qui réunirait les trois composantes au sein d'une unique architecture. Cette représentation illustre aussi les différentes approches d'hybridation qui peuvent apparaître, en fonction du point de départ et des axes privilégiés pour se rapprocher du modèle idéal :

- un modèle bottom-up amélioré pour inclure une meilleure description des préférences : c'est le cas du modèle CIMS développé par l'équipe de Mark Jaccard (EMRG), dans lequel les

[43] A cause de cela, nous apportons une correction à la figure originale de Hourcade, Jaccard et al. (2006), qui jugent le modèle conventionnel TD bien placé dans l'axe de représentation des préférences.

fonctions de choix technologiques sont calibrées sur des données d'enquête microéconomique ;

- un modèle bottom-up auquel on a ajouté un module macroéconomique compact pour représenter les rétroactions macroéconomiques des changements techniques dans le secteur énergétique : c'est le cas de MARKAL-MACRO ;

- un modèle top-down dans lequel certains secteurs sont décrits par un ensemble discret de technologies concurrentes, comme SGM (Second Generation Model, (Fawcett et Sands, 2005), EPPA couplé avec MARKAL-Transport, GEMINI-E3 couplé avec MARKAL-Résidentiel) ;

- un modèle top-down amélioré pour mieux représenter les comportements : cette démarche est presque absente de la littérature. On pourrait citer ici le modèle macro économétrique E3MG, qui est estimé sur des données historiques et qui peut donc prétendre à une plus grande robustesse sur le court ou moyen terme.

Cette explicitation tridimensionnelle du cahier des charges des modèles est éclairante mais elle peut donner lieu à une interprétation erronée, selon laquelle la représentation des univers techniques et de leur évolution ne serait qu'une question de précision dans l'énoncé des technologies et de leurs caractéristiques. En réalité, la dynamique des univers techniques est le résultat de l'interaction permanente : (i) des possibilités technologiques existantes, et forcément de celles qui sont déjà « installées » dans les équipements et infrastructures en place, (ii) des usages et des comportements courants, responsables de l'évolution de la demande, (iii) du contexte économique générale, des prix relatifs, qui conditionnent la profitabilité respective des différentes technologies, et du revenu disponible, qui conditionne la capacité de financement des nouveaux équipements et des nouvelles infrastructures.

En développant des modèles hybrides, certaines équipes de modélisation se sont attaquées, avec un certain succès, à combiner représentation détaillée des technologies et fonctionnement global de l'économie, mais, en négligeant généralement l'axe de représentation des préférences, à l'exception du modèle CIMS dont l'originalité repose précisément sur ce point. Le quatrième rapport d'évaluation du GIEC (2007) se fait l'écho de cette absence de prise en compte dans les modèles de prospective des barrières à l'adoption des technologies de rupture :

> "In general, there is a continued need for a better understanding of how rates of adoption of climate-mitigation technologies are related to national and regional climate and non-climate policies, market mechanisms (investments, changing consumer preferences), human behaviour and technology evolution, change in production systems, trade and finance and institutional arrangements". (Technical Summary, p. 93)

De ce diagnostic devrait découler un programme de recherche à deux volets :

- Confirmer les progrès de l'hybridation ou du couplage entre modules de description détaillée des technologies et modèle de représentation globale de l'économie ; abandonner tout modèle n'ayant pas évolué vers cette double représentation.
- Faire évoluer les modèles vers une meilleure prise en compte des préférences individuelles, des distributions de revenu à l'intérieur des régions, des barrières économiques et socioculturelles à l'adoption de nouvelles technologies ou de nouveaux usages.

2.2 Changement technique induit : un progrès inachevé

L'examen de l'évolution des frontières techniques est étroitement lié à la représentation de la croissance économique dans son ensemble, comme nous l'avons évoqué au paragraphe 1.1. Le changement technique est un point névralgique des projections de long terme car ce sont la vitesse et l'ampleur de son déploiement qui conditionne *in fine* la durabilité des trajectoires (cf. la réponse de Nordhaus, 1973, en réponse à Meadows et al., 1972).

Lors de la construction de scénarios de référence, la projection du changement technique joue un rôle central dans l'évaluation des intervalles d'incertitude sur les trajectoires futures ; elle repose généralement sur trois types d'hypothèses :

- **Une hypothèse exogène sur la trajectoire de productivité globale** des facteurs (dans les modèles macroéconomiques) ou de croissance du PIB par habitant (dans les modèles top-down).

- **Une hypothèse exogène de croissance de l'efficacité énergétique** au niveau agrégé ou sectoriel, à travers un indicateur unique, nommé AEEI – Autonomous Energy Efficiency Improvement (Manne et Richels, 1992). Cet indicateur fait décroître le poids du facteur *énergie* dans la fonction de production, à un rythme prescrit et indépendant des autres variables du modèle ; il est donc censé encapsuler toutes les évolutions techniques non liées aux prix des énergies, y compris le changement structurel dans l'économie lorsqu'il est appliqué au niveau global. En général sa valeur est comprise entre 0.5 et 1% par an de gains d'efficacité énergétique à prix constants.

- **Des hypothèses exogènes sur les technologies « backstop »** : celles-ci correspondent à des technologies connues mais pas forcément encore disponibles, mais qui devraient être disponibles sans limite de quantité à un coût donné dans le futur (Nordhaus et Boyer, 2000).

A ces hypothèses exogènes, il faut rajouter les substitutions *endogènes* entre énergies ou entre l'énergie et les autres facteurs de production : ces substitutions répondent à des variations de prix relatifs au cours de la trajectoire, dues notamment à la déplétion des ressources d'énergies fossiles ; elles sont représentées soit par une fonction de production agrégée ou sectorielle dans les modèles macroéconomiques, soit par une variation du portefeuille de technologies dans les modèles technico-économiques.

Nous avons vu au premier chapitre que le caractère largement exogène des hypothèses de progrès technique peut conduire, dans les scénarios de référence, à des fourchettes d'incertitude qui ne sont en fait qu'un artefact combinatoire, parce que la mise cohérence discursive des hypothèses en amont n'est pas suffisante. Cette faille est encore plus gênante du fait que les recommandations politiques qui émergent des modèles peuvent elles aussi être très dépendantes des hypothèses de scénarios, comme le soulignent Azar et Dowlatabadi (1999) :

> '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)

Les grandes tendances agrégées encapsulées dans le coefficient AEEI recouvrent des phénomènes d'innovation, de diffusion, des choix d'orientation des progrès technologiques dans différents secteurs qui ne peuvent être supposés fixés une fois pour toutes lorsque l'on veut représenter des réorientations

énergétiques de grande ampleur sur plusieurs décennies, comme c'est le cas pour les trajectoires de stabilisation des concentrations des GES.

Premièrement, à long terme, le changement technique ne peut être résumé à des substitutions de facteurs le long d'une frontière de production connue dès le départ ou parmi un panier de technologies déjà matures. Au fil du temps, de nouvelles technologies apparaissent, les substitutions peuvent devenir plus faciles (élargissement de l'éventail de technologies disponibles, baisse du coût des technologies alternatives), ou au contraire moins accessibles (blocage lié à l'existence ou l'inexistence d'infrastructures, dépendance au sentier, cf. Arthur, 1987). En utilisant les résultats du modèle bottom-up POLES, Ghersi et Hourcade (2006) ont ainsi mis en évidence des exemples dans lesquels aucun paramétrage d'une fonction de production néoclassique usuelle ne permet de restituer fidèlement les larges bifurcations du système énergétiques induites par une politique de réduction sur plusieurs décennies.

Deuxièmement, les efforts d'innovation vers des techniques plus efficaces ou l'utilisation d'énergies non carbonées répondent à des *incitations* parmi lesquelles les prix des énergies jouent un rôle certain, en modifiant les anticipations de profitabilité des investissements (Popp, 2002 ; Dowlatabadi et Oravetz, 2006).

Une première amélioration aujourd'hui considérée comme acquise dans une partie importante des modèles est de représenter l'inertie de pénétration des progrès énergétiques à travers les générations de capital successives (Solow, 1959). Cette modification permet de rendre compte du lien entre l'évolution de l'efficacité énergétique globale et le taux de renouvellement du capital et donc des investissements, même si l'évolution de la frontière technologique reste entièrement *ad hoc* (Löschel, 2002).

Pour pallier les lacunes évidentes d'une représentation exogène du changement technique, les modèles ont été modifiés pour 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 (2001, §8.4.5, p. 550) et le quatrième (2007, §2.7.2, § 3.4.3, §11.5) permet de constater les efforts importants pour évaluer numériquement les effets de l'induction du changement technique sur les coûts de stabilisation et le contenu des politiques[44]. Ces efforts de représentation d'un **progrès technique endogène** se focalisent sur trois mécanismes :

- **L'induction du changement technique par la recherche** (Learning by Searching) : dans la filiation directe de certaines « nouvelles » théories de croissance (Romer, 1990 ; Lucas, 1988), l'innovation est représentée par l'accumulation d'un stock de connaissances, dont l'évolution dépend des investissements cumulés en R&D. Ce stock de connaissances a ensuite un impact direct sur les paramètres d'efficacité énergétique (Bosetti et al., 2006 ; Popp, 2006). Ce type de représentation peut aussi être incorporé dans une courbe d'apprentissage à deux facteurs (cf. paragraphe suivant).

- **Le progrès technique lié à l'apprentissage** (Learning by Doing) : certaines technologies aujourd'hui embryonnaires sont appelées à prendre une place significative dans les portefeuilles de technologies futurs, en particulier sous l'effet d'une contrainte CO_2 croissante. Cela pourra être le cas par exemple des cellules photovoltaïques, du moteur à hydrogène, des véhicules électriques, des agrocarburants ou des technologies nucléaires de nouvelle génération. Dans les modèles

[44] '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.' (AR4, §11.5.1)

énergétiques ou macroéconomiques, ces technologies ne peuvent entrer dans le choix de portefeuille qu'à condition de devenir rentables par rapport aux technologies majoritaires, ce qui peut arriver lors de la hausse progressive des coûts des technologies carbonées à cause de la déplétion ou d'une taxe carbone. Mais l'observation de l'évolution des coûts réels des nouvelles technologies émergentes a montré que ces coûts diminuent fortement au fur et à mesure de leur déploiement (IEA, 2000 ; Grübler et Messner, 1998). La baisse de ces coûts peut ensuite jouer un rôle majeur dans la pénétration des nouvelles technologies, en modifiant largement les termes de la compétition entre technologies. Ce mécanisme est incorporé dans les modèles à travers des courbes d'apprentissage, reliant la décroissance des coûts de chaque technologie au cumul des capacités installées dans cette technologie. Arguant que l'apprentissage passe à la fois par la R&D et l'usage, Kouvaritakis et al. (2000) ont proposé une courbe d'apprentissage à deux facteurs, prenant en compte les efforts de R&D spécifiques et les capacités cumulées. Malgré le caractère très attrayant de ces spécifications, l'estimation économétrique des paramètres de ces courbes pose d'importantes difficultés quantitatives (Söderholm et Sundqvist, 2003).

- La prise en compte des **externalités technologiques positives** (spillovers) : les développements technologiques d'une région se diffusent en général dans les autres régions même sans effort spécifique de leur part (Griliches, 1992) et malgré les protections de la propriété intellectuelle censées préserver un niveau élevé de profitabilité pour les innovations. Pour prendre en compte ces externalités technologiques positives, les modélisateurs intègrent dans les fonctions de coûts de tous les secteurs une variable liée à l'ensemble des connaissance accumulées dans tous les secteurs (Carraro et Siniscalco, 1997 ; Golombek et Hoel, 2005 ; Bosetti et al., 2006).

Les larges efforts pour représenter ces différents mécanismes ont contribué à faire évoluer un certain nombre d'affirmations pour la décision publique – sur le tempo optimal de l'action, les instruments à mettre en oeuvre, les coûts nets des politiques de réduction. Néanmoins ces avancées butent encore sur des difficultés empiriques (estimation des courbes d'apprentissage, des stocks de connaissance) et algorithmiques (grande sensibilité aux conditions initiales, optimisation avec des non-convexités) (Messner, 1997). Le Tableau 7 tiré du dernier rapport d'évaluation du GIEC propose une synthèse des conséquences de ces nouvelles représentations.

	Changement technologique exogène	**Changement technologique endogène**
Mécanismes	Trajectoire autonome indépendante du contexte	Trajectoire dépendante de réponses comportementales concernant (i) les choix d'investissements de R&D, (ii) les choix d'investissement de capacités et les effets d'apprentissage qui en découlent
Implications pour la modélisation :		
Terminologie	Exogène	Endogène / Induit
Paramètres usuels	AEEI – Autonomous Energy Efficiency Index	Externalités (*spillovers*), Taux d'apprentissage (*learning rate*), coûts de la R&D
Implications pour le calcul optimal	Optimum unique avec algorithmes standard	Possibilités d'équilibres multiples ; difficultés d'identification de l'optimum global

Conséquences économiques / pour la décision		
Coûts de la stabilisation des 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	Idem mais externalités positives liées à la diffusion du progrès technique

Tableau 7 : Implications des modes de représentation du changement technique
Source : IPCC, 2007, Table 11.13

Malgré ces progrès de représentation, les modélisateurs restent aujourd'hui « au milieu du gué » en ce qui concerne la description du changement technique endogène. Premièrement, la transformation des frontières de production sous l'effet de politiques climatiques est vue sous un angle très partiel, puisque le progrès technique induit ne concerne que le coût des technologies énergétiques ou les gains d'efficacité énergétiques. Deuxièmement, l'impact de cette transformation « induite » sur la productivité générale de l'économie reste un mécanisme ignoré et/ou mal compris.

La transformation des frontières de production

Comme nous l'avons mentionné plus haut, l'utilisation d'une fonction de production dont les paramètres sont exogènes tout au long d'une trajectoire de long terme pose problème, autant pour la production d'un scénario de référence unique que pour la comparaison de deux trajectoires prenant des « chemins de croissance » très différents dans leur contenu technique et matériel. La représentation de l'innovation apporte une première modification allant dans le bon sens, puisque l'évolution du coefficient de l'énergie dans la fonction de production devient endogène et liée aux choix d'investissements faits tout au long du sentier de croissance. Néanmoins il est possible et probable que les choix menant à une bifurcation importante vers des systèmes énergétiques différents, supposant des changements drastiques dans les systèmes de transport, de logement ou d'organisation industrielle, modifient aussi d'autres paramètres de la fonction de production, comme les élasticités de substitution ou l'efficacité des autres facteurs. Par exemple, une rénovation énergétique massive de l'habitat existant et la construction de nouveaux bâtiments à très faible consommation énergétique solliciterait des modifications profondes des structures de production des secteurs de production des matériaux et du bâtiment, pour répondre à une variation rapide de la demande de matériaux, à la fois dans leur nature (par ex. du bois à la place de l'acier et du ciment) et leurs qualités physiques (matériaux isolants, verre spécial pour les panneaux photovoltaïques, etc.).

Cette question reste encore peu traitée dans la littérature. Son traitement reste complexe dans les structures de modélisation figées des paradigmes historiques. Seuls les efforts d'hybridation conduisant à remettre en question certaines contraintes mathématiques des représentations macroéconomiques (fonctions de production continues) et technico-économiques (fonctions des

demande estimées économétriquement) proposent des nouvelles pistes de progrès sur ce point. Nous renvoyons le lecteur à l'évocation précédente des travaux de Ghersi (2003), Ghersi et Hourcade, (2006) ou encore Jaccard et al., (2000) pour la description de ces travaux.

L'impact des politiques climatiques ou énergétiques sur la productivité générale des facteurs

La réorientation de la transformation des frontières de production passe par la mobilisation, au moins transitoire, d'investissements sectoriels supplémentaires destinés à modifier le système énergétique (tant du côté de l'offre que de celui des usages finaux). Se pose alors la question de l'effet d'éviction potentiel des investissements supplémentaires consentis au titre des politiques énergétiques ou climatiques : une hausse transitoire des investissements conduit-elle à une baisse des investissements non énergétiques et à un ralentissement des gains de productivité dans tous les secteurs ?

Goulder et Schneider (1996) soutiennent que les efforts de R&D dans le domaine énergétique ont un effet d'éviction (crowding-out) sur les efforts de recherche dans le reste de l'économie, avec un effet net négatif sur la croissance. Or, les observations ne permettent pas de déterminer si ces investissements sont vraiment substituables et si les efforts supplémentaires ne viendront s'ajouter aux effort préexistants, avec un effet final positif. Plus généralement, se pose la question de l'effet net de l'interaction des externalités technologiques (spillovers) et des effets d'éviction (crowding-out) : Nordhaus (1999) fournit des informations quantitatives qui laissent penser que la résultante est négligeable et que l'effet d'éviction annule quasiment le bénéfice du progrès technique induit sur la croissance (Nordhaus, 1999). Nordhaus (2002) va plus loin en affirmant que le rôle des substitutions dans les politiques de réduction des émissions est très largement supérieur à l'effet du changement technique induit et que, finalement, les modèles traditionnels sans progrès technique induit encapsulent la majeure part des mécanismes sur lesquels les politiques doivent agir. Pourtant, l'histoire économique est parsemée d'exemples d'innovations dont les effets globaux sur l'économie mondiale ont largement dépassé les dépenses consenties (efforts de recherche militaire, internet, etc.)

Ce débat nous fait aussi remonter à « l'hypothèse Porter » (Porter et Van der Linde, 1995), selon laquelle les régulations environnementales peuvent susciter une large refonte des procédés industriels, conduisant *in fine* à une plus forte hausse de la productivité, notamment grâce à l'avantage commercial du « premier innovateur ». Cette hypothèse très controversée nous renvoie précisément à la nécessité d'aller plus loin dans les progrès de représentation en endogénéisant les trajectoires de productivité et le changement technique *non-énergétique*, mais ces tentatives sont encore trop rares[45].

La limite absolue de l'étude du changement technique endogène reste l'ignorance inévitable des innovations futures aujourd'hui inexistantes et susceptibles de modifier la trajectoire énergétique et économique. Mais la poursuite des efforts selon les deux pistes de travail mentionnées ci-dessus devrait permettre d'obtenir un tableau plus complet du rôle des mécanismes endogènes de changement technique.

[45] On notera qu'il y a un réel problème sémantique dans la dénomination des modèles qui affichent une « croissance endogène » mais dans lesquels le changement technique endogène ne concerne que l'efficacité énergétique et le coût des technologies alternatives. Il s'agit principalement de modèles à « changement technique induit ».

3 L'articulation du Normatif et du Positif : quel statut donner à l'Optimalité ?

Le troisième et dernier volet de notre diagnostic concerne le statut des hypothèses d'optimalité dans les modèles. Ce sujet est au cœur de nombreuses controverses au sein des économistes (Kirman, 1992 ; Cohen et Harcourt, 2003) ou dans les travaux d'épistémologie sur les sciences économiques (Mouchot, 2003). Notre motivation pour ouvrir ici la « boîte de Pandore » de ce sujet peut être résumée par la question suivante : quelle est la légitimité des modèles pour informer la décision dans un monde *imparfait* et en général *sous optimal*, s'ils décrivent un monde optimal et/ou « de premier rang » ?

Pour répondre à cette question, il est utile d'effectuer de nouvelles incursions du côté de la théorie économique. Cela nous permet de rappeler le sens et les limitations des concepts sous-jacents à l'utilisation de l'optimalité dans les modèles. La pratique quotidienne des modèles économiques conduit parfois à oublier qu'ils reposent sur des hypothèses « héroïques », issues de théories beaucoup plus prudentes que leur usage courant pourraient le laisser croire. Deux de ces hypothèses occupent une place centrale dans les modèles économiques qui nous préoccupent : le paradigme de l'agent représentatif et les anticipations « rationnelles ».

3.1 L'agent représentatif ou « les fondements micro des modèles macro »

Les modèles économiques sont tous fondés sur une représentation agrégée des nombreux agents économiques réels et de leurs décisions. Pour décrire le comportement agrégé d'un grand nombre d'agents économiques – qu'il s'agisse de consommation, de production, d'échanges internationaux, de flux de capitaux, etc. – il existe fondamentalement deux types d'approches :

- Une démarche *phénoménologique*, qui consiste à modéliser un comportement ou un mécanisme *agrégé* par une ou plusieurs équations dont la forme mathématique est inspirée de l'observation des faits et qui relient entre elles les variables qui semblent jouer un rôle dans le mécanisme considéré. Cette approche est adoptée par exemple dans les modèles macroéconométriques, comme E3MG, ou bien de manière plus ponctuelle, dans la représentation de fonctions de demande (par exemple dans POLES), ou de système de parts (par exemple dans SGM).

- Une démarche *par agent représentatif*, qui consiste à supposer que le comportement agrégé peut être correctement décrit par des équations de comportement « individuel », avec des paramètres correspondant à l'agrégat économique représenté : un producteur représentatif par secteur, un consommateur représentatif par région, etc. Cette approche est le fondement de tous les modèles d'équilibre général et des modèles macroéconomiques compacts.

Le choix entre ces deux approches renvoie à deux problèmes méthodologiques bien distincts mais entremêlés.

Le premier problème a trait à la préoccupation légitime de fonder l'analyse macroéconomique sur la connaissance des comportements individuels, ce que la littérature nomme *les fondements microéconomiques de la macroéconomie*. Cette question est au centre d'un débat épistémologique en sciences sociales qui oppose *holisme* et *individualisme méthodologique* : le holisme « pur » consiste à penser que les comportements individuels s'expliquent par la structure sociale dans laquelle ils se

situent, tandis que l'individualisme méthodologique affirme la primauté de la décision individuelle et affirme que les évolutions de l'agrégat *ne* résultent *que* de la somme des actes individuels. Comme le montre J.-P. Dupuy en proposant un « individualisme méthodologique complexe », le fonctionnement de l'économie ne peut être réduit exclusivement à aucune de ces approches :

> « Considérons […] les deux propositions : 1) ce sont les hommes qui font (ou plutôt « agissent ») leur société ; 2) la société les dépasse en ce qu'elle est (infiniment) plus complexe qu'eux […]. On voit ici la possibilité de penser l'irréductibilité du social par rapport aux individus sans pour autant faire de celui-ci une substance ou un sujet. » (Dupuy, 1992, p. 222, cité dans Mouchot, 2003, p. 225)

Dans sa Théorie Générale (1969), J. M. Keynes affirme la nécessité d'une dose de holisme, en réaction à l'hégémonie de l'individualisme méthodologique en économie ; il affirme bien que les mécanismes globaux qu'il prétend analyser ne peuvent être réduits à l'analyse ou l'agrégation directe des comportements individuels. A l'opposé, la théorie de l'équilibre général s'est développée de pair avec un individualisme méthodologique pur, ce qui explique qu'elle échoue à expliquer certains mécanismes *systémiques* comme le chômage involontaire. Pourtant, ce n'est pas le concept d'un équilibre walrasien simultané sur tous les marchés de biens et services qui est contradictoire avec l'existence d'effets de système dépassant les rationalités individuelles, mais en fait l'hypothèse que les agents représentatifs sont parfaitement clairvoyants sur l'ensemble du système économique, et donc ne peuvent jamais, avec cette hypothèse, prendre une décision qui soit déséquilibrée par rapport à l'évolution du système économique. Aujourd'hui, les pratiques de modélisation que nous analysons dans cette thèse sont très largement dominées par une posture d'individualisme méthodologique, autrement dit d'un quasi-monopole de la microéconomie dans les représentations du monde réel. Une des raisons de cette domination réside dans la recherche d'une forte cohérence *logique* entre l'analyse microéconomique et la représentation globale de l'économie[46]. Le résultat est que les modèles sont en général incapables de représenter les mécanismes de déséquilibre à court terme ou de trajectoires sous-optimales, limite qui nous semble plus critique que la fidélité ou non à un concept d' « agent représentatif clairvoyant » largement sorti de son cadre théorique original.

Cela nous entraîne vers le second problème, concernant le concept théorique d'agent représentatif, qui consiste à représenter le comportement d'un agrégat comme s'il s'agissait du comportement d'un seul individu, et donc mû par une rationalité microéconomique propre. Ce choix méthodologique est plus restrictif encore que l'adoption d'un individualisme méthodologique pur : rien n'oblige, sous prétexte que l'on cherche à expliquer les phénomènes agrégés par la somme des décisions individuelles, à représenter précisément les phénomènes agrégés de la même manière que les décisions individuelles[47]. De nombreux travaux sur l'agrégation des comportements individuels soulignent qu'une telle transposition des comportements microéconomiques à l'échelle macroéconomique n'est possible qu'au prix d'hypothèses mathématiques très restrictives, portant soit sur l'utilisation de fonctions de demandes ou de parts de budget linéaires (Muellbauer, 1976), soit sur la stabilité de la distribution statistique des propriétés des agents microéconomiques (Malinvaud, 1993b, Hildenbrand et Kneip, 1999). Cependant, même si l'on renonce à cette agrégation dite « parfaite », trop limitative pour être acceptable dans le cas général, le concept d'agent représentatif peut rester pertinent s'il permet une description plausible de l'agrégat considéré. Dans cet esprit, John

[46] Mouchot (2003) complète l'explication de cette domination par deux autres raisons : d'une part la perte d'efficacité des politiques keynésiennes dans les années 60 ; d'autre part, la lutte intellectuelle contre une flambée des holistes au même moment, avec le marxisme et le structuralisme.

[47] « The needs for microfundations and for a stable and unique equilibrium would not seem, by themselves, to justify the use of such an artificial device as the representative agent » (Kirman, 1992, p. 121)

Muellbauer précise que les « préférences collectives », que le consommateur représentatif est censé représenter, ne sont qu'une abstraction utile pour représenter le réel :

> "One might ask whether the assumption of community preferences in my sense has any ethical connotations? Does it, for example, aid in finding out whether one social situation is better than another? The answer to this is that it does not. What it does offer is an elegant and striking informational economy." (Muellbauer, 1976, p. 980)

De même la fonction de production utilisée par Solow (1956) ou la fonction « subrogée » de Samuelson (1962) poursuivent-elles le même objectif, à mi-chemin entre un ancrage à la théorie microéconomique et un certain pragmatisme empirique :

> "It is the case, I believe, that Robert Solow and I have pretty much the same general views in this matter, having arrived independently and together at the same general conclusions. […] One might almost say that there are two Solows: the orthodox priest of the MIT school and the busman on a holiday who operates brilliantly and without inhibitions in the rough-and-ready realm of empirical heuristics. […] I shall use the new tools of the Surrogate Production Function and Surrogate Capital to show how we can sometimes predict exactly how certain quite complicated heterogeneous capital models will behave by treating them *as if* they had come from a simple generating production function (even when we know they did not *really* come from such a function). (Samuelson, 1962, pp. 193-194)

Si l'on s'en tient à cette position, la motivation théorique de fonder toute représentation macroéconomique sur des mécanismes microéconomiques, motivation fréquemment invoquée pour justifier l'usage d'un agent représentatif, n'est plus le motif central du recours à l'agent représentatif. Comme A. Kirman (1992) tente de le démontrer, l'usage du paradigme microéconomique de la maximisation de l'utilité individuelle (ou du profit pour un producteur) au niveau global n'est alors plus justifié et risque même de fournir une fausse représentation des mécanismes agrégés :

> « There is no plausible formal justification for the assumption that the aggregate of individuals, even maximizers, acts itself like an individual maximizer. Individual maximization does *not* engender collective rationality […]. Trying to explain the behaviour of a group by that of one individual is constraining. The sum of the behaviour of simple economically plausible individuals may generate complicated dynamics, whereas constructing one individual whose behaviour has these dynamics may lead to that individual having very unnatural characteristics. » (Kirman, 1992, p. 118)

Cette critique fait aussi écho aux débats sur la représentation des univers techniques que nous avons traités plus haut : à travers les faiblesses de l'agent représentatif pointées par Kirman, de la même manière que dans la critique de la théorie néoclassique par Joan Robinson, la représentation simplifiée d'un agrégat économique par une entité représentative fictive dotée d'une rationalité microéconomique est attaquée à la fois sur ses justifications théoriques et sur sa pertinence empirique. Par ailleurs, de même qu'à l'issue des discussions ayant eu lieu au sein de la controverse des deux Cambridges, cette critique a finalement eu un faible écho dans les pratiques de modélisation parce qu'elle ne propose pas une alternative simple à mettre en œuvre. Nous sommes forcés de reconnaître que ces solutions de représentation « stylisée » présentent l'avantage d'une simplicité technique réelle, notamment en ce qui concerne le calibrage des fonctions de demande ou de production sur les parts de budget ou de coûts instantanées, via le lemme de Shepard. A. Kirman (1992) mentionne aussi qu'il est bien conscient de la persistance tenace du paradigme de l'agent représentatif, notamment pour sa simplicité, mais il esquisse quand même les pistes de progrès qu'il faudrait envisager : d'une part **l'abandon de l'hypothèse de maximisation** des « pseudo » préférences collectives pour décrire les

comportements agrégés, d'autre part **la représentation de l'hétérogénéité des agents** au sein des agrégats représentés.

Les pratiques de modélisation dans le champ de l'énergie et du climat ne montrent pas ou très peu d'évolutions dans ce sens. Au contraire, certains modélisateurs forcent le trait en ayant recours à une hypothèse de maximisation *intertemporelle* d'une utilité collective, ce qui constitue certainement la version la plus « héroïque » du paradigme de l'agent représentatif. C'est par exemple le cas des modèles d'équilibre général WIAGEM et EDGE[48], ou encore de tous les modèles de croissance optimale de la famille DICE/RICE ou MACRO. Howarth (2000) réduit même le concept d'agent représentatif à sa seule version intertemporelle, en l'opposant à une approche en générations imbriquées. Nous avons déjà souligné plus haut que le recours à l'agent représentatif intertemporel était difficile à justifier par le besoin de représentation de la croissance à long-terme ; elle n'est pas plus justifiée par la théorie de l'agent représentatif. Dès lors, nous rejoignons la critique de R. Solow, pour qui cette modélisation n'a aucun intérêt pour la *représentation* du monde réel :

> « I cannot say the same about the use made of the intertemporally-optimizing representative agent. Maybe I reveal myself merely as old-fashioned, but I see no remeeding social value in using this construction, which Ramsey intended as a representation of the decision-making of an idealized policy-maker, as if it were a descriptive model of an industrial capitalist economy. It adds little or nothing to the story anyway, while encumbering it with unnecessary implausibilities and complexities.» (Solow, 1994)

Dans cette approche, il y a finalement un double tour de force. Le premier, que nous venons d'analyser, consiste à oublier que l'agent représentatif n'est justifié que tant qu'il constitue une façon élégante et efficace de décrire le comportement agrégé d'un ensemble d'agents économiques. Le second tour de force est d'attribuer à cet agent représentatif une clairvoyance parfaite, qui coïncide avec les états futurs de l'économie calculés par le modèle, une spécification qui tient largement à un glissement de sens de la théorie des anticipations rationnelles.

3.2 Anticipations parfaites : la mauvaise compréhension de la théorie des anticipations rationnelles

La maximisation intertemporelle de l'utilité va de pair avec une hypothèse d'anticipations parfaites (*perfect foresight*). Cette hypothèse consiste à supposer, dans les modèles, que les anticipations que les agents économiques formulent à une date t, sur l'état de l'économie à la date t+n, sont toujours exactes, c'est-à-dire coïncident exactement avec l'état projeté de l'économie à la date t+n. Pour tout observateur du monde réel, cette hypothèse est singulièrement héroïque et peu plausible. Pour comprendre comment les modélisateurs en sont venus à l'adopter, il faut revenir à la théorie des anticipations *rationnelles*. Cette théorie correspond à un cadre bien défini en économie, mais nous nous trouvons une fois de plus face à un appauvrissement significatif entre la littérature d'origine de cette théorie et son interprétation lors de sa diffusion plus large dans le reste des sciences économiques.

Le corpus théorique servant de base au concept d'anticipations rationnelles nous fait remonter jusqu'à l'article fondateur de J. Muth en 1961. Dans cet article, J. Muth avance l'hypothèse que les agents économiques utilisent toute l'information disponible pour formuler leurs anticipations et qu'ils ne commettent pas d'erreur persistante dans ces anticipations. Une de ses motivations est de répondre

[48] Certaines équipes de modélisation ayant développé des modèles récursifs affichent même leur intention de passer à une version « intertemporelle » de leur modèle, comme l'équipe du MIT avec EPPA (Paltsev et al. , 2005).

à une grande insatisfaction vis-à-vis des formules d'anticipations adaptatives utilisées jusque là dans la littérature[49], car ces formules d'anticipations adaptatives, qui sont contraintes par le choix d'une forme mathématique donnée, échouent à prendre en compte les raisonnements plus complexes dont sont capables les agents économiques pour affiner leurs anticipations au fur et à mesure de leurs observations. Autrement dit, les anticipations des agents *tendent* à être identiques aux prévisions de la théorie économique. Cette hypothèse a donné lieu à de nombreux tests économétriques, conduisant en général à sa validation sur de nombreux marchés différents (Kantor, 1979). Cette hypothèse microéconomique a eu un retentissement très significatif à la fois sur la macroéconomie et sur la modélisation intertemporelle. En macroéconomie, c'est à propos des politiques de stabilisation de l'inflation et du chômage que cette hypothèse eut un retentissement important : au cours des débats sur l'inefficacité des politiques keynésiennes à la fin des années 60, R. Lucas (1972, 1973) puis T. Sargent (Sargent et Wallace, 1975) démontrèrent que si cette hypothèse est vérifiée, alors les politiques publiques de stabilisation de l'inflation ne peuvent avoir d'impact à long terme sur l'activité économique, car l'effet recherché sera toujours annulé par l'anticipation sans biais des agents économiques sur les conséquences de la politique. Cette analyse a alors soulevé la question de la différence entre affichage et contenu réel des politiques publiques : selon Arrow (1978), l'effet d'une annonce de politique peut être supérieur à celui de la politique lui-même, ce à quoi Kantor (1979) réplique, dans une cohérence parfaite avec la théorie des anticipations rationnelles, que les agents économiques auront vite fait d'adapter leurs anticipations au décalage entre annonce et contenu réel des politiques si ce décalage est persistant. Nous pouvons aisément illustrer l'argument de Kantor avec une politique de réduction des émissions de GES : une annonce de prix élevé du carbone ne conduira à une décarbonisation significative et durable que si elle est suivie d'une politique visant à instaurer effectivement ce prix élevé, sinon l'effet de l'annonce ne sera que temporaire. Il faut donc bien comprendre la théorie des anticipations rationnelles comme une théorie *statistique* de convergence vers un régime stabilisé.

Cette théorie donne lieu à une erreur d'interprétation majeure, qui consiste à passer des anticipations *rationnelles*, telles que définies par J. Muth, à celle des anticipations *exactes*. Ce glissement est très certainement lié au succès de la diffusion du cadre théorique de l'équilibre général intertemporel posé par Arrow et Debreu dans les exercices de modélisation à visée plus empirique. Dans ce cadre théorique, l'incertitude, qui était au centre de l'analyse de Muth, disparaît au profit de l'équivalent-certain. Autrement dit, l'hypothèse originelle de l'apprentissage des agents et de la nullité de l'espérance des erreurs d'anticipation est remplacée par une hypothèse d'exactitude permanente des anticipations :

> "…the rational expectations approach need not and should not assume that men apply reason to "circumstances that are perfectly known." […] The implication that economic agents or economists are omniscient cannot fairly be drawn from Muth's profound insights. It suggests rather that information is costly and that it will be used efficiently" (Kantor, 1979)

Sous cette nouvelle hypothèse d'anticipations *exactes*, le rôle spécifique du temps dans la dynamique économique disparaît : autrement dit, passé et futur sont identiquement connus avant toute décision économique. Dans les modèles fondés sur cette hypothèse, toute trajectoire économique est un équilibre intertemporel résolu d'un seul coup. Cette approche est critiquable, et critiquée, parce

[49] Les anticipations adaptatives étaient utilisées dans les discussions autour de la courbe de Philips, qui, dans sa version statique, ne prenait pas en compte l'apprentissage des travailleurs sur l'anticipation de l'inflation lors de la négociation de leurs salaires. (Kantor, 1979) fournit un rappel historique de ces débats théoriques.

qu'elle revient à supposer que les agents économiques peuvent à tout instant échanger sur les marchés futurs comme sur les marchés présents. Or il est clair que les marchés futurs n'existent que pour une petite partie des biens (commodités, produits financiers, etc.) et seulement à certains horizons, comme le soulignait Kenneth Arrow :

> "It is true that the rational expectations hypothesis implies that the outcomes on future markets are well anticipated, but it is hard to see why this should be true. The very concept of the market and certainly many of the arguments in favor of the market system are based on the idea that it greatly simplifies the informational problems of economic agents, that they have limited powers of information acquisition, and that prices are economic summaries of the information from the rest of the world. But in the rational expectations hypothesis, economic agents are required to be superior statisticians, capable of analyzing the future general equilibria of the economy." (Arrow, 1978, p. 160)

Ce glissement de sens se répercute dans des termes similaires au niveau des modèles de prospective énergie-climat, lorsqu'il s'agit de justifier telle ou telle hypothèse d'anticipations dans les modèles. Par exemple, Manne et Rutherford (1994), auteurs du modèle intertemporel MERGE, et acteurs reconnus des efforts de modélisation économie-énergie-climat depuis trois décennies, reconnaissent le manque de plausibilité des anticipations *parfaites* :

> « Intertemporal equilibrium involves the simultaneous determination of prices and quantities during a sequence of time periods. This is a convenient fiction, but is a debatable idea. Aside from financial instruments, there is no actual markets for purchases and sales in a distant future." (Manne et Rutherford, 1994)

Pourtant, ce n'est pas pour condamner définitivement cette pratique que Manne et Rutherford soulignent ce défaut majeur. Juste après, ils s'empressent d'éliminer ce qu'ils présentent comme l'approche alternative, c'est-à-dire les modèles récursifs fondés sur des hypothèses d'anticipations myopes :

> « Rutherford (1993) reports, however, that his recursive trade model can be ill-behaved when it is based upon an activity analysis description of production and there is a rapidly changing world. […] For additional examples of these difficulties, see the numerical solutions obtained through "system dynamics", e.g. Meadows et al. (1972). Typically, such models have a tendency toward overshoot and collapse. We have found that many of these inconsistencies can be overcome through an intertemporal approach. Clairvoyance is an implausible assumption, but myopia seems even worse." (Manne et Rutherford, 1994)

Cet argumentaire présente au moins trois failles :

- Il n'envisage que deux solutions polaires pour la représentation des anticipations : anticipations parfaites vs. myopes. Pourtant, toutes les hypothèses d'anticipations adaptatives, ainsi que les anticipations *rationnelles* définies par J. Muth, se situent entre ces deux cas polaires et représentent des solutions éventuellement préférables aux deux cas extrêmes envisagés par Manne et Rutherford.

- Il assimile modèles « récursifs » et anticipations myopes, alors que ces deux spécifications sont indépendantes, même si, dans la pratique, les modèles récursifs incluent souvent l'hypothèse simpliste des anticipations myopes. Cette association systématique n'est pas justifiée, même si, à l'inverse, le recours à une résolution intertemporelle n'est cohérent qu'avec une hypothèse d'anticipations parfaites.

- Pour justifier l'adoption de l'hypothèse des anticipations parfaites, qui se rapporte au choix de représentation des comportements, cet argumentaire compare les propriétés numériques des différents types de modèles, récursifs vs. intertemporels. L'argument selon lequel il faudrait se résigner à adopter une spécification peu plausible (anticipations parfaites) pour éviter des difficultés de résolution numérique nous semble peu tenable.

Face à cet argumentaire, la théorie *originale* des anticipations rationnelles fournit des pistes de travail pour améliorer les choix de représentation des modèles. Dans la réalité, les agents économiques formulent des anticipations à partir de toute l'information dont ils disposent et révisent leurs anticipations au fur et à mesure de l'arrivée de nouvelles informations. En conséquence nous posons les principes suivants :

(i) L'hypothèse de myopie des agents est résolument fausse ;

(ii) Les hypothèses d'anticipations adaptatives sont plus plausibles mais il faut veiller à ce qu'elles n'engendrent pas de biais systématique dans les erreurs, notamment à cause de formes mathématiques trop contraignantes (par exemple une sous-estimation systématique due à une équation linéaire pour un phénomène quadratique).

(iii) L'hypothèse d'anticipation parfaite n'est pas non plus plausible parce que l'évolution de l'économie est conditionnée par des effets de système et des chocs ne pouvant pas être anticipés avec les seules informations dont disposent les agents au moment de prendre leurs décisions.

Dans la réalité des modèles de prospective énergie-climat, la majeure partie des modèles utilisés repose soit sur une hypothèse de myopie, soit sur une hypothèse d'anticipations parfaites en équilibre intertemporel. Quelques-uns se situent au stade intermédiaire en incluant des anticipations adaptatives (par exemple, SGM, POLES, Imaclim-R). Mais aucune de ces spécifications pragmatiques ne satisfait au diagnostic ci-dessus. Pour résumer, anticipations adaptatives et anticipations parfaites sont deux manières de se rapprocher d'une réalité proche des anticipations rationnelles telle qu'elles sont définies par J. Muth. Malheureusement la théorie des anticipations rationnelles ne fournit pas de précision sur les modalités concrètes de représentation des décisions des agents. Pour la mettre en œuvre, il faudrait déterminer avec précision quelles sont les informations dont disposent les agents au moment de formuler leurs anticipations et de prendre leur décision, et quels sont les perturbations fréquentes non anticipées qui sont responsables des déviations entre anticipations et réalisations. Sans ces précisions, c'est une théorie qui reste hors du champ opérationnel, ce qui est le cas général. Dans ce contexte, il semble que la coexistence de l'approche intertemporelle avec anticipations parfaites et de l'approche des anticipations adaptatives (forcément dans des modèles *récursifs*) peut permettre d'avoir deux bornes de comportement qui encadrent le réel.

Cette discussion ne peut s'achever sans une remarque plus large sur la traduction usuelle de l'hypothèse de rationalité dans les modèles économiques : celle-ci est toujours limitée à la maximisation du profit ou de la consommation des agents (via une fonction d'utilité dépendant uniquement de la consommation de biens et services). Pourtant il est évident que les agents économiques prennent en considération, dans leurs raisonnements et leurs décisions, de nombreux éléments sociaux non couverts par l'objectif de profit ou de consommation. Il peut s'agir de normes sociales ou de préférences individuelles. C'est sûr ce point en particulier que T. Koopmans concluait son discours de Prix Nobel en 1975 :

> "One final remark. The economist as such does not advocate criteria of optimality. He may invent them. He will discuss their pros and cons, sometimes before but preferably after trying out their implications. He may also draw attention to situations where all other objectives, such as productive efficiency, can be served in a decentralized manner by particularized criteria, such as profit maximization. *But the ultimate choice is made, usually only implicitly and not always consistently, by the procedures of decision making inherent in the institutions, laws and customs of society*[50]." (Koopmans, 1975)

Cette seule remarque suffit à justifier, dans certains cas, un écart par rapport au paradigme de l'optimalité dans les modèles. Le recours à des *routines* de comportement, sous formes de fonction de réaction explicites, peut être plus adapté pour décrire le réel que le recours systématique à une maximisation de profit. Cela pose bien sûr un problème non trivial d'introduction d'hypothèses « arbitraires » dans les modèles, problème que nous traitons dans le paragraphe suivant.

3.3 La résistance de l'hypothèse d'optimalité : une question « d'ancrage » ou un abus de mathématiques ?

Nous avons examiné dans les deux sous parties précédentes les concepts théoriques sous-jacents à l'utilisation de l'optimalité dans la représentation du monde futur. Il nous semble qu'en parallèle de ces théories, qui servent à *justifier* leur transposition souvent « déformante » dans les modèles, il existe deux raisons supplémentaires qui permettent d'*expliquer* le succès de l'optimalité comme paradigme de représentation du monde et la difficulté de proposer des méthodes alternatives : d'une part l'indétermination qui caractérise un monde « sous-optimal » et l'inconfort qui en résulte, d'autre part l'attrait mathématique des problèmes de recherche d'optimum.

L'abandon d'un critère d'optimalité laisse en général le modélisateur sans critère de décision général sur le mode de représentation le plus proche du réel. Pour pallier l'indétermination qui en découle, le modélisateur doit définir des règles de comportements à travers d'autres critères de décision, souvent considérés comme « ad hoc » :

> "The rational expectations side of the argument has the considerable advantage of definiteness and convenience. It also has the disadvantage that it is thought to be implausible by the very people whose mental processes it is meant to describe. The other side of the argument has the disadvantage of indefiniteness; it leaves a lot of options, with no good fact-based way of choosing how to represent expectations." (Solow, 2000)

Pourtant, l'introduction des critères de décision alternatifs à la maximisation du profit est un enjeu majeur de la modélisation, puisqu'il s'agit de prendre en compte les normes sociales, les routines de comportements des agents. Par exemple, pour la fixation des prix du pétrole, l'observation des prix réels ne permet pas de vérifier, même sur le long terme, la loi de Hotelling, censée refléter une optimisation intertemporelle du profit. Dans ce cas, il est indispensable, pour la représentation d'une variable aussi déterminante pour l'orientation des choix énergétiques, d'incorporer les autres mécanismes qui président à la fixation du niveau des prix, comme les limites de capacités pour les fluctuations de court terme, l'évolution des réserves à long-terme, et le prix des substituts potentiels.

Le critère de maximisation du profit concerne normalement la représentation des décisions *microéconomiques*, mais, du fait de l'utilisation généralisée du paradigme de l'agent représentatif, il est directement transposé aux agrégats économiques – production ou consommation. Or, on sait que ce

[50] Souligné par nous.

critère d'optimisation n'est pas l'unique force motrice des décisions microéconomiques, ce qui devrait changer aussi le comportement agrégé. Akerlof (2007) montre ainsi que la majorité des « grandes lois » de la macroéconomie néoclassique[51] n'est plus valide lorsque l'on prend en compte le rôle des normes sociales dans les décisions des agents. Par « normes », Akerlof désigne ce que la façon dont les agents pensent « qu'ils doivent agir » pour être en conformité avec leur environnement socioculturel.

> "…this lecture will also question the generality of the preferences that lead to the five neutralities. There is a sense in which those preferences are very narrowly defined. They have important missing motivation — since they fail to incorporate the norms of the decision makers. Those norms reflect how the respective decision makers think they and others *should* or *should not* behave, even in the absence of frictions. Preferences reflecting such norms yield a macroeconomics with important remnants of the early Keynesian thinking. They also yield a macroeconomics that, in important details, cannot be obtained only with frictions." (Arkelof, 2007, p. 6)

Ce constat n'est pas nouveau en soi : la majeure partie de la *sociologie* est consacrée à l'identification des motivations et des raisons d'agir des individus, raisons qui dépassent largement le cadre de la maximisation d'une utilité réduite à une fonction exclusive du profit ou de la consommation. La première originalité de l'article d'Akerlof est de montrer que l'importance des normes sociales dans les décisions est de nature à invalider la totalité des « lois » fondées sur des hypothèses de perfection dans un monde purement optimisateur de profit ou de consommation. La seconde originalité de cet article est d'identifier les failles méthodologiques qui sont à l'origine de l'ignorance persistante des normes susceptibles de compter dans les processus de décision : d'une part l'impotence des tests économétriques pour rejeter les modèles sans normes et la confiance systématique placée dans ces tests en économie ; d'autre part le refus des économistes d'adopter une approche plus empirique que théorique, approche qui ferait bénéficier l'économie des connaissances et méthodes de la sociologie et de l'anthropologie :

> « The omission of norms from macroeconomics, as well as from economics more generally, can be explained by economists' adherence to positive economics. […]In particular, he [Friedman] says that economic theorists should strive for parsimonious modeling. According to Friedman, they should even forsake realistic assumptions in pursuit of such parsimony. Maximization models with only *objective* arguments of utility have been defined as more parsimonious than models where people, additionally, lose utility insofar as they, or others, fail to live up to their standards. As a result, whatever the empirical validity or relevance of such norms, positive economics has a methodological bias against their consideration. It privileges models without norms. » (Akerlof, 2007, p. 28).

Finalement, le strict recours au critère d'optimisation du profit ou de l'optimisation permet d'éviter la discussion ouverte des autres critères de décision, telles les normes mentionnées par G. Akerlof, et d'ignorer les exigences empiriques fortes de cette discussion. Le statut inviolable du critère d'optimalité est renforcé par le succès du formalisme mathématique dans l'enseignement et la littérature économiques. Ce formalisme mathématique, accompagné de l'augmentation des facilités de calcul numérique, s'est imposé aux dépends de la réflexion sur le sens économique des modèles[52].

---

[51] G. Akerlof désigne ces lois comme des règles de « neutralité » : (i) l'indépendance de la consommation et du revenu instantané, ou hypothèse du cycle de vie ; (ii) l'indépendance entre décisions d'investissement et profits courants, ou théorème de Modigliani-Miller ; (iii) l'indépendance à long terme de l'inflation et du chômage ; (iv) l'incapacité des politiques monétaires à modifier la production, corollaire de l'hypothèse d'anticipations rationnelles ; (v) l'indépendance de la consommation et des taxes, ou équivalence ricardienne.

[52] Ce glissement vers le formalisme mathématique était déjà clairement identifié par W. Leontief dès 1974 : "Le souci constant de travailler sur une réalité imaginaire, hypothétique, plutôt qu'observable, a conduit progressivement à une distorsion de l'échelle officieuse des valeurs qui est en usage dans notre milieu universitaire pour évaluer et classer les travaux scientifiques de ses membres. Selon cette échelle, l'analyse

Comme les démonstrations théoriques ne sont en général tractables qu'avec des hypothèses très simplificatrices, la prise en compte de critères de décision alternatifs, de normes sociales, d'imperfections, d'asymétries d'information, etc. ne peut être bien réalisée sous peine de rendre les calculs infaisables. Du coup, les lois générales issues des démonstrations analytiques simplificatrices sont érigées en « normes » au sein de l'économie et les modélisateurs se contentent de respecter ces normes pour la représentation du monde réel.

4 Conclusion

Le diagnostic que nous présentons dans ce chapitre est à la fois sévère et enthousiasmant :

(i) Un diagnostic *sévère* parce qu'il constate, sur de nombreux points théoriques, un glissement sémantique entre les théories économiques originelles et leur transposition opérationnelle dans des modèles de représentation du monde réel. Ce problème ne concerne pas plus spécialement la communauté de recherche sur le climat et l'énergie, comme le montre l'analyse globale de Mouchot (2003). Il plaide pour une *exégèse* générale des normes de l'économie, telle que le consommateur représentatif, la fonction de production agrégée, les anticipations rationnelles. Bien sûr il faut rajouter à l'éventuel glissement sémantique des théories originales le fait que le modélisateur numérique n'a guère le temps de contester ou de maîtriser les tenants et aboutissements de ces théories. De fait, il pense pouvoir s'appuyer sur une auto-révision des sciences économiques qui n'a pas vraiment lieu, et qui devrait maintenir une plus grande rigueur autour des limites intrinsèques à ces différents concepts théoriques.

(ii) un diagnostic *enthousiasmant* parce qu'il dégage de nombreuses ouvertures possibles dans la révision des pratiques de modélisation pour une meilleure évaluation des politiques et un appui à la décision plus robuste. Parmi ces ouvertures, nous avons dégagé plusieurs chantiers majeurs :

- La nécessité d'une justification détaillée et sectorielle des hypothèses de rattrapage de productivité utilisées pour générer les scénarios de croissance ;
- L'insuffisance du modèle néoclassique de croissance ou du modèle intertemporel de Ramsey pour représenter la complexité des mécanismes de croissance économique et pour évaluer les coûts des dommages climatiques, des chocs énergétiques et des politiques, parce qu'il néglige les mécanismes d'ajustement ou de fluctuations à court et moyen terme ;
- L'inadaptation de la fonction de production néoclassique pour modéliser les potentiels d'évolution techniques sur le long terme et proposer une représentation tangible des capacités de production et de leurs caractéristiques technologiques, ainsi que des infrastructures.
- La nécessité de poursuivre les efforts d'endogénéisation du changement technique et structurel, pour l'instant limités aux effets d'apprentissage sur les coûts des technologies énergétiques futures ;
- La nécessité de dépasser les restrictions imposées (i) par un recours systématique au paradigme d'optimisation de l'utilité du consommateur représentatif, avec des fonctions d'utilité dépendant uniquement de la consommation, (ii) par un recours occasionnel à une hypothèse d'anticipations parfaites, dont la plausibilité est très discutable, et qui conduit à une sous-estimation systématique des déséquilibres et des coûts de transition ;

---

empirique est plus mal notée que le raisonnement mathématique formel." (Leontief, 1974, cité dans Mouchot, 2003, p.115)

Ces insatisfactions vis-à-vis des pratiques dominantes en modélisation nécessitent un certain nombre d'innovations, ou au moins d'amendements des pratiques, en ligne avec les connaissances théoriques et empiriques accumulées en économie. L'enjeu est ici d'assurer la progression continue des outils de représentation du monde réel et d'évaluation des politiques, dans un contexte d'évolution rapide des décisions politiques et d'exigences grandissantes quant à la plausibilité et la rigueur des évaluations numériques. En effet, les politiques climatiques sont maintenant à l'ordre du jour des décisions nationales et locales, et ne se limitent plus à la négociation d'une « grande architecture » de régulation internationale. Chaque pays, chaque région, chaque zone urbaine se prépare à adopter dans la décennie à venir des mesures de réduction des émissions, de sécurité énergétique ou d'adaptation au changement climatique. L'amélioration des modèles pouvant fournir une aide à la décision est en voie d'être dépassée par la rapide prise en charge politique du dossier climatique ; il devient urgent de réviser les outils de modélisation pour éviter qu'ils ne deviennent trop obsolètes pour fournir une aide à la décision dans la mise en œuvre concrète des divers instruments envisagés.

Enfin, nous avons souligné à deux reprises l'insatisfaction soulevée par l'usage de l'optimisation intertemporelle pour décrire la croissance économique (§1.2) ou les dynamiques de demande agrégée (§3.1). Cette insatisfaction suscite une remarque plus générale sur l'ambiguïté du statut de l'optimisation intertemporelle dans les outils et dans les simulations. Il est certainement plausible de représenter des agents économiques dont les décisions sont prises en fonction d'un calcul intertemporel, surtout dans les secteurs très concentrés et intensifs en capital, comme le secteur électrique[53]. Par contre, il n'est guère plausible de supposer que la dynamique économique dans son ensemble correspond à la maximisation du bien-être collectif par un planificateur bienveillant hypothétique. Le recours à l'optimisation intertemporelle devrait donc être limité :

(i) *en tant que représentation du monde réel*, aux secteurs dont le comportement agrégé relève clairement d'une optimisation des investissements, en gardant à l'esprit que, dans le monde réel, cette optimisation est réalisée dans un contexte d'anticipations adaptatives face à un futur incertain ;

(ii) *en tant que critère de décision collective*, à la recherche des stratégies optimales de politiques publiques en situation d'incertitude sur le futur.

[53] Il n'est pas certain que la libéralisation de ce secteur, auparavant administré de manière centrale dans la majorité des régions du monde, génère une situation idéale où les décisions d'investissements décentralisées corresponde à une situation d'optimum collectif.

Références

Abramovitz, M., 1986, “Catching up, Forging Ahead, and Falling Behind”, *Journal of Economic History*, XLVI, 2, 385-406

Aghion, P., Howitt, P., 1992, “A Model of Growth through Creative Destruction”, *Econometrica*, 60(2), 323-51

Akerlof, G. A., 2007, “The Missing Motivation in Macroeconomics”, *American Economic Review* 97(1), 5-36

Alcamo, J., Kreileman, G.J.J., Krol, G.J.J., Zuidema, G., 1994, “Modeling the global society-biosphere-climate system: Part 1: Model description and testing”, in *Image 2.0: Integrated Modeling of Global Climate Change*, J. Alcamo (ed.), 1-35, Kluwer Academic Publishers.

Ambrosi, P., 2004, *“Amplitude et calendrier des politiques de réduction des émissions face aux risques climatiques : leçons des modèles intégrés”*, Thèse de Doctorat, Sciences Économiques, Hourcade, J-C (dir.), Paris, EHESS, 375 p.

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

Arrow, K. J., 1978, “The Future and the Present in Economic Life”, *Economic Inquiry*, 16(2), 157-69

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

Baron, R., Hourcade, J.C., 1994, “The bottom-up versus top-down controversy, a useful provocation for economic research on environment and technological change”, 50th Congress of the International Institute of Public Finance "Public Finance, Environment and Natural Ressources", Harvard University, 22-25 août, 11 p.

Barro, R. J., 1990, “Government Spending in a Simple Model of Endogenous Growth”, *Journal of Political Economy*, 98(5), 103-126

Barro R. J., Sala-i-Martin X., 1992, “Convergence”, *Journal of Political Economy*, 100(21), 223-251

Bernard, A.B., Jones, C.I., 1996a, “Comparing apples to oranges: productivity convergence and measurement across industries and countries”, *American Economic Review*, 86, 1216–1252

Bernard, A.B., Jones, C.I., 1996b, “Technology and Convergence”, *The Economic Journal*, 106(437), 1037-1044

Blaug, M., 2001, “No history of ideas, please, we’re economists”, *Journal of Economic Perspectives*, 15(1), 145-164

Bosetti, V., C. Carraro, M. Galeotti, E. Massetti, M. Tavoni, 2006, “WITCH: A World Induced Technical Change Hybrid Model”, *The Energy Journal*, Special Issue “Hybrid Modelling of Energy Environment Policies: Reconciling Bottom-up and Top-down”, 13-38

Boulding, 1971, “After Samuelson Who Needs Adam Smith?”, *History of Political Economy*, 3(2), 225-237

Carraro, C., Siniscalco, D., 1997, “R&D cooperation and the stability of international environmental agreements”, in: Carraro, C. (Eds.), *International Environmental Negotiations: Strategic Policy Issues*. Edward Elgar, Cheltenham, pp. 71-96

Carree, M.A., Klomp, L., Thurik, A.R., 2000, “Productivity convergence in OECD manufacturing industries”, *Economic Letters*, 66, 337–345

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

Cho, D., 1994, “Industrialization, Convergence and Patterns of Growth”, *Southern Economic Journal*, 61(2), 398-414

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

Crassous, R., Hourcade, J.-C., Sassi, O., 2006, “Endogenous structural change and climate targets. Modelling experiments with Imaclim-R”, *The Energy Journal*, Special Issue n° 1, 259-276

Denison, E.F., 1962, *The Sources of Economic Growth in the US and the Alternatives Before Us*. Committee for Economic Development, New York

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

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

Duncan, R., Wilson, C., 2004, Global population projections – is the UN getting wrong?, RIRDC Publication No 04/041, Australian Government, Full report

Durlauf, S., Johnson, P., 1995, “Multiple regimes and cross-country growth behavior”, *Journal of Applied Econometrics*, 10, 365-84

Elmslie, B.T., 1995, “Retrospectives: the *convergence* debate between David Hume and Josiah Tucker”, *Journal of Economic Perspectives*, 9, 207-216

Fawcett, A., Sands R., 2005, “The Second Generation Model: Model Description and Theory”, working paper PNNL-15432, http://www.epa.gov/oar/sgm_theory_final_1.pdf

Fougeyrollas, A., Le Mouël, P., Zagamé, P., 2005, “Les nouvelles théories de la croissance en application : L’évaluation des politiques structurelles, le cas du protocole de Kyoto”, *Revue économique*, 56(5), 1089 -1105

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

Galor, O., 1996, “Convergence? Inference from theoretical models”, *The Economic Journal*, 106, 1056-1069

Gerschenkron, A., 1952, “Economic backwardness in historical perspective” in *The Progress of Underdeveloped Areas.* (ed. B.-F. Hoselitz). Chicago: University of Chicago Press

Ghersi, F., 2003, *Changement technique et double dividende d’écotaxes : un essai sur la confluence des prospectives énergétique et macro-économique*, Thèse de Doctorat, EHESS, Hourcade, J.-C. (dir.), Paris, 289 p.

Ghersi, F., Hourcade, J.-C., 2006, “Macroeconomic Consistency Issues in E3 Modeling: The Continued Fable of the Elephant and the Rabbit”, *The Energy Journal*, numéro spécial *Hybrid Modeling of Energy-Environment Policies: reconciling Bottom-up and Top-down* : 39-62

GIEC, 1995, *Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions of Climate Change, Contribution of Working Group III to the Second Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, J.P.Bruce, H.Lee, E.F.Haites (Eds), Cambridge University Press, UK, 448 pp

GIEC, 2001, *Climate Change 2001: Mitigation, Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, Bert Metz, Ogunlade Davidson, Rob Swart and Jiahua Pan (Eds.), Cambridge University Press, UK. 700 pp

GIEC, 2007, *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., 851 pp

Golombek, R., Hoel, M., 2005, “Climate policy under technology spillovers”, *Environmental and Resource Economics*, 31, 201-227

Goodwin, R. M., 1951, "The Nonlinear Accelerator and the Persistence of Business Cycles", *Econometrica*, 19, 1-17

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

Griliches, Z., 1992, "The Search for R&D Spillovers", *Scandinavian Journal of Economics*, 94, 29-47

Grübler, A., Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., Fenhann, J., Hare, B., Mori, S., Pepper, B., Pitcher, H., Riahi, K., Rogner, H.-H., La Rovere, E., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, R.P., Swart, R., Victor, N., Yong Jung, T., 2004, "Emissions Scenarios: A Final Response", *Energy and Environment*, Vol. 15, No. 1, pp. 11-24

Grübler, A., Messner, S., 1998, "Technological change and the timing of mitigation measures", *Energy Economics*, 20(5-6), 495-512

Hallegatte, S., 2005, "*Interactions d'échelles en économie : application à l'évaluation des dommages économiques du changement climatique et des évènements extrêmes*", Thèse de Doctorat, Sciences Économiques : Hourcade J-C (dir.) : Paris, EHESS, 298 p.

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), 330-340

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

Hickman, B. G., Huntington, H. G., Sweeney, J. L., 1987, *Macroeconomic Impacts of Energy Shocks*, Amsterdam: North-Holland

Hicks, J. R., 1939, *Value and Capital*, New York and London: Oxford University Press

Hicks, J. R., 1965, *Capital and Growth*, New York and London: Oxford University Press

Hicks, J. R., 1973, *Capital and Time: a Neo-Austrian Theory*, New York and London: Oxford University Press

Hildenbrand, W., Kneip, A., 1999, "Demand aggregation under structural stability", *Journal of Mathematical Economics*, 31, 81-109

Holtsmark B., Alfsen K, 2004, "The use of PPP or MER in the construction of emission scenarios is more than a question of 'metrics'", *Climate Policy*, 4, 205-216

Hourcade, J.-C., 2007, "Les modèles dans les débats de politique climatique : entre le Capitole et la Roche Tarpéienne ? » in Dahan-Dalmedico, A. (dir.). *Les modèles du futur. Changement climatique et scénarios économiques : enjeux politiques et économiques*, A. Dahan-Dalmedico (dir.), 2007, Paris : La Découverte

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*

Hourcade, J. C., Robinson, J., 1996, "Mitigating Factors: Assessing the Costs of Reducing GHG Emissions", *Energy Policy*, 24 (10/11), 863-873

Howarth, R., 2000, "Climate Change and the Representative Agent", *Environmental & Resource Economics*, European Association of Environmental and Resource Economists, vol. 15(2), 135-148

International Energy Agency, 2000, *Experience Curves for Energy Technology Policy*, IEA, Paris

Inada, K.-I., 1963. On a two-sector model of economic growth: comments and a generalization, *Review of Economic Studies*, 30 (2), 119–127.

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

Jaccard, M.K., Nyboer, J., Bailie, A., Taylor, A., Sadownik, B., Laurin, A., Murphy, R., Bataille, C; Nanduri, M., D'Abate, R. et C. Lai, 2000, *Integration of GHG Emission. Reduction Options using CIMS*. Rapport préparé pour Analysis and Modelling Group Climate Change National Implementation Process

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

Johansen, L., 1972, *Production functions: An integration of micro and marco, short run and long run aspects*, North-Holland, Amsterdam, 274 pp.

Jones, D.W., Leiby, P.N., 1996, "The Macroeconomic Impacts of Oil Price Shocks: A Review of Literature and Issues", Oak Ridge, Ten.: Oak Ridge National Laboratory

Jones, D. W., Leiby, P. N., Paik, I. K., 2004, "Oil Price Shocks and the Macroeconomy: What Has Been Learned Since 1996?", *The Energy Journal* 25(2): 1-32

Kaldor, N., 1940 "A Model of the Trade Cycle", *Economic Journal*, 50, 78-92

Kalecki, M., 1939, *Essays in the Theory of Economic Fluctuation*, 1972 edition, London: Allen and Unwin.

Kantor, B., 1979, "Rational Expectations and Economic Thought", *Journal of Economic Literature*, 17(4), 1422-1441

Keynes, J. M., 1936, *The General Theory of Employment, Interest and Money*, Macmillan Cambridge University Press.

Kirman, A., P., 1992, "Whom or what does the representative individual represent?", *Journal of Economic Perspectives*, 6, 117-136

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

Koopmans, T.C., 1975, "Concepts of optimality and their uses", Nobel Prize Lecture, December, 11, 1975

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*, 14(1-4), 222-248

Leontief, W., 1974, *Essais économiques*, Paris, Calmann-Levy

Lévy-Garboua, V. , Denizot, F.-B., 1972, "Le problème de l'agrégation : un essai de synthèse", *Revue économique*, 23(1), 20-53

Löschel, A., 2002, "Technological Change in Economic Models of Environmental Policy: a Survey", *Ecological Economics*, 43, 105-126

Lucas, R., J., 1988, "On the mechanics of economic development", *Journal of Monetary Economics*, Elsevier, 22(1), 3-42

Lucas, R. Jr., 1972, "Expectations and the Neutrality of Money", Journal of Economic Theory, 4(2), 102-24

Lucas, R. Jr., 1973, "Some International Evidence on Output-Inflation Tradeoffs", *American Economic Review*, 63(3), 326-34

Maddison, A., 2001, *The World Economy: A Millennial Perspective*. Paris: OECD, 2001, 384 pp.

Malinvaud, E., 2002, "Les problèmes d'agrégation en macroéconomie", Colloque international du vingtième anniversaire du GREQAM, Vieille charité, Marseille, 29 juin 2002

Malinvaud, E., 1993a, "Regard d'un ancien sur les nouvelles théories de la croissance", *Revue Economique*, n° 2, mars 1993, 171-188

Malinvaud, E., 1993b, “A Framework for Aggregation Theories”, *Ricerche Economiche, 47:2,*107-135

Malinvaud, E., 1977, *The theory of unemployment reconsidered*, Basil Blackwell.

Manne, A.S., Rutherford, T.F., 1994, “International trade, Capital Flows and Sectoral Analysis: formulation and solution of intertemporal equilibrium models”, in W.W. Cooper and A.B. Whinston, eds., *New Directions in Computational Economics*, Springer, 1994, 191-205

McKibbin, W. J. , Pearce, D., Stegman, A., 2007, “Long term projections of carbon emissions”, *International Journal of Forecasting*, Elsevier, vol. 23(4), pages 637-653

Meadows, D., Meadows, D., 1972, *The Limits to Growth : A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*, New York, USA, Universe Books

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

Miketa, A., 2001, “Analysis of Energy Intensity Developments in Manufacturing Sectors in Industrialized and Developing Countries”, *Energy Policy*, 29, 769-775

Miketa, A., 2004, “The Use of Purchasing Power Parities in Long-Term EconomicGrowth Scenarios”, presentation at IIASA, International Institute for Applied System Analysis (IIASA), Laxenburg

Mouchot, C., 2003, *Méthodologie économique*, Seuil, coll. Points Economie, 558 p.

Mork, K. A., “Business Cycles and the Oil Market”, *The Energy Journal*, Special Issue, 15, 15-38

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

Muth, J. F., 1961, “Rational Expectations and the Theory of Price Movements”, *Econometrica*, 29, 315-335

Nordhaus, W. D., 1973, “World Dynamics: Measurement Without Data”, *The Economic Journal*, 83 (332), 1145-1183

Nordhaus, W., 1999, “Modeling induced innovation in climate change policy”, Paper for the workshop *Induced Technological Change and the Environment*, June 21-22, 1999, IIASA, Laxenburg

Nordhaus, W. D., Boyer, J., 2000, Warming the World : Economics Models of Global Warming. MIT press.

Nordhaus, W., 2007, “Alternative measures of output in global economic-environmental models: Purchasing power parity or market exchange rates?”, *Energy Economics*, 29(3), 349-372

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), 160-180

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, 163-174

Quah, D., 1996, “Empirics for economic growth and convergence”, *European Economic Review*, 40(6), 1353-1375

Quah, D. T., 1993, “Galton.s Fallacy and the Convergence Hypothesis”, *Scandinavian Journal of Economics*, 95, 427-443

Ramsey, F., 1928, “A Mathematical Theory of Saving”, *Economic Journal*, 38(152), 543–559

Robinson, J., 1956, *The Accumulation of Capital*, Londres: Macmillan

Robinson, J., 1954, “The Production Function and the Theory of Capital”, *Review of Economic Studies*, 21(2), 81-106

Romer, P. M., 1986, “Increasing Returns and Long-run Growth”, *Journal of Political Economy*, University of Chicago Press, 94(5), 1002-1037

Romer, P.M., 1990; “Endogenous Technological Change”, *Journal of Political Economy*, University of Chicago Press, 98(5), 71-102

Sala-i-Martin, X., 1996, “Regional cohesion: Evidence and theories of regional growth and convergence”, *European Economic Review*, 40(6), 1325-1352

Sala-i-Martin, X., 1990, *On growth and states*, Ph.D. Dissertation, Harvard University.

Samuelson, P. A., 1966, “A Summing Up”, *Quarterly Journal of Economics*, 80(4), 568-583

Samuelson, P. A., 1962, “Parable and Realism in Capital Theory: The Surrogate Production Function”, *Review of Economic Studies*, 29(3)

Sargent, T. J., Wallace, N., 1975, “'Rational' Expectations, the Optimal Monetary Instrument and the Optimal Money Supply Rule”, *Journal of Political Economy*, 83(2), 241-255

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

Söderholm, P., Sundqvist, T., 2003, “Learning Curve Analysis for Energy Technologies: Theoretical and Econometric Issues”, paper presented at the International Energy Workshop (IEW), Laxenburg, Austria, June 24-26.

Solow, R., 1956, “A Contribution to the Theory of Economic Growth”, *Quarterly Journal of Economics*, 70, 65-94

Solow, R., 1957, “Technical Change and the Aggregate Production Function.”, *Review of Economics and Statistics*, 39, 312-320

Solow, R., 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., 1970, *Growth Theory: An Exposition*, Clarendon Press, Oxford, U.K.

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

Solow, R., 2000, “Toward a Macroeconomics of the Medium Run”, *The Journal of Economic Perspectives*, 14(1), 151-158

Stiglitz, J., 1990, “Some Retrospective Views on Growth Theory presented on the occasion of the Celebration of Robert Solow’s 65th Birthday”, in *Growth/Productivity/Unemployment*, P. Diamond (ed.), Cambridge, Mass.: MIT Press, 1990a, 50–68

Tobin, J., 1980, “Stabilization Policy Ten Years After”, *Brookings Papers on Economic Activity*, 1, 19-71.

Tol, R., 2006, “Exchange Rates and Climate Change: An Application of *Fund*”, *Climatic Change*, 75(1-2), 59-80

Uzawa, H. 1961. “On a Two-Sector Model of Economic Growth.” *Review of Economic Studies*, 29, 40-47

Wicksell, K., 1911, *Lectures on Political Economy, Volume 1*. London: Routledge & Sons

Chapitre 3

IMACLIM-R : Une Architecture de Simulation pour l'Évaluation de la Durabilité des Trajectoires

'The models most widely applied in the theoretical analysis of problems of economic growth can be classified in the following three groups : (a) Models with a given capital coefficient (…) (b) Models with fixed production coefficients (…) (c) Models with explicitly expressed possibilities of substitution between total labor input and capital stock in a traditional production function (…). Models belonging to any of these groups may, of course, contain important and realistic aspects and be well suited for certain objectives. I have, however, the feeling that many theorists (…) often have been working with a "guilty conscience" regarding the realism of their assumptions.' (Leif Johansen, 1959, pp. 157-158)

Le chapitre précédent rend compte d'un ensemble d'insatisfactions importantes et transversales vis-à-vis des pratiques de modélisation des trajectoires macro-énergétiques sur le long terme. Certaines de ces insatisfactions sont clairement identifiées dans la littérature économique consacrée au climat et à l'énergie, comme les restrictions imposées par les hypothèses de premier rang[54]. D'autres insatisfactions sont largement ignorées, comme celle que suscite la représentation stabilisée de la croissance, ou connues mais peu suivies d'effet dans la pratique, comme les faiblesses du paradigme du consommateur représentatif pour décrire les problèmes distributifs ou les économies duales.

Deux perspectives s'offrent alors pour remédier à ces insatisfactions. La première consiste à amender les modèles existants pour y intégrer des spécifications alternatives ou complémentaires. C'est la démarche qui a conduit au développement de la majorité des modèles hybrides actuels et qui explique en partie l'augmentation continue de la complexité des modèles. Cette augmentation de la complexité ne répond que très partiellement à nos insatisfactions tant que la modélisation hybride ne remet pas en question les paradigmes qui posent problème en ce qui concerne la représentation de la croissance, les fonctions de production, ou les anticipations parfaites. La seconde perspective consiste à proposer des modèles aux spécifications innovantes permettant des représentations différentes du monde réel.

Cette seconde perspective a guidé le développement du modèle dynamique IMACLIM-R[55] au cours de cette thèse. Ce développement s'est appuyé sur des expériences passées de modélisation au CIRED, ayant mené à l'élaboration d'une architecture de modélisation statique comparative, IMACLIM-S (Hourcade, 1993, Ghersi, 2003, Ghersi et Hourcade, 2006). Ce modèle de projection statique est un précurseur du modèle dynamique présenté ici dans la mesure où il a permis de défricher certaines idées innovantes sur l'abandon de la fonction de production néoclassique, l'intégration d'informations disparates dans un modèle entrée-sortie en équilibre général ou encore le relâchement de l'hypothèse de plein emploi. Néanmoins cette architecture statique, bien que très utile parce que plus facile à adapter sur de nouveaux découpages géographiques ou sectoriels, ne permet pas de reconstituer des trajectoires complètes et d'étudier les mécanismes de bifurcation d'un régime de croissance à un autre, ni d'évaluer le coût et l'efficacité des politiques dans la transition entre l'état présent et l'état projeté dans plusieurs décennies. Cette limitation a justifié le développement de l'architecture dynamique présentée ici, avec un cahier des charges centré autour de la poursuite des innovations amorcées dans le modèle statique.

Ce chapitre présente le modèle IMACLIM-R. La première partie décrit le cahier des charges qui découle du diagnostic des deux chapitres précédents et 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 sera dédié à une description technique complète des différents modules dynamiques sectoriels.

---

[54] Ces limitations sont soulignées dans le Résumé pour les Décideurs du quatrième rapport d'évaluation du 3ème groupe de travail (box SPM-3) : « Most models use a global least cost approach to mitigation portfolios and with universal emissions trading, assuming transparent markets, no transaction cost, and thus perfect implementation of mitigation measures throughout the 21st century.»

[55] L'acronyme IMACLIM, hérité de travaux passés au CIRED, signifie « **Im**pact **A**ssessment of **Clim**ate Policies ».

1 Stratégie de modélisation et structure du modèle

La stratégie de modélisation adoptée pour l'élaboration de l'architecture Imaclim-R découle directement des trois enjeux de représentation explorés dans le chapitre précédent : la croissance économique, l'évolution des univers techniques et les modes de formation des décisions des agents économiques. Nous reprenons ici ce même triptyque pour expliciter nos choix de méthodologie.

1.1 La représentation de la croissance économique

Nous avons exposé plus haut nos réticences à utiliser l'équilibre intertemporel pour décrire le comportement agrégé de l'économie. Ce diagnostic, favorable au choix alternatif des modèles dynamiques récursifs, est confirmé par notre ambition de représenter à la fois le moteur de la croissance à long terme et les frictions pouvant survenir à court terme, afin de proposer simultanément des trajectoires de long terme plausibles et des évaluations de coûts plus réalistes. Seule une architecture récursive peut permettre cette double représentation, puisque, par définition, un modèle intertemporel décrit une trajectoire stabilisée, résolue d'un seul coup, avec une allocation optimale des investissements et sans surprises. Au contraire une architecture récursive décrit la croissance économique comme une succession d'équilibres statiques : chaque équilibre statique est un cliché de l'économie à une date ou sur période donnée ; la dynamique de l'économie est représentée à travers l'évolution des variables sur une succession d'équilibres.

Par ailleurs, le choix d'une architecture récursive amène à renoncer à l'hypothèse des anticipations parfaites et oblige à formuler des hypothèses exogènes ou à programmer des routines adaptatives sur le taux d'épargne et l'allocation des investissements. Dès lors, un modèle récursif peut reproduire, à chaque étape de résolution, des « erreurs » par rapport à ce qui serait globalement optimal, lesquelles erreurs sont responsables de tensions supplémentaires sur les marchés, de situations d'insuffisances de moyens de production et des effets transitoires sur les prix relatifs. En plus de ces erreurs, il est possible d'introduire entre deux étapes des perturbations exogènes sur la trajectoire (dommages climatiques, choc pétrolier ou gazier, etc.), possibilité méthodologique d'autant plus importante que la sécurité et la prévention des risques de rupture est de plus en plus intégrée dans la recherche des trajectoires durables (German Advisory Council on Global Change, 2008).

Cependant l'adoption d'un mode récursif est une condition nécessaire mais pas suffisante pour une représentation très ouverte des fluctuations de court terme, le long d'une trajectoire de long terme. Cela dépendra en fait de la justesse de la représentation des rigidités et des moyens disponibles pour que les agents économiques corrigent, au fil de la trajectoire, les erreurs ou les chocs exogènes rencontrés. Si les fonctions d'utilité et les fonctions de production sont supposées flexibles, et que l'équilibre statique est fondé sur un paradigme d'égalisation systématique des productivités marginales des facteurs, il est très probable que les capacités d'adaptation des agents et des outils de production seront surestimées : l'effet des erreurs ou des chocs sera minimisé d'un équilibre statique au suivant, et la trajectoire s'approchera, dans son ensemble, d'une trajectoire stabilisée, voire optimale. Or les fluctuations de court terme observées dans l'économie réelle sont le plus souvent liées à des erreurs d'anticipation, des comportements hétérogènes vis-à-vis du risque, des évolutions de marché mal prévues, des changements de politique non prévisibles, des évènements géopolitiques « exogènes » à l'économie de marché. Pour se doter d'un outil de capable de représenter ce type de mécanismes, il faut renoncer à la fois à l'équilibre intertemporel et à des hypothèses de flexibilité immédiate des marchés, des modes de production ou des comportements. Les recherches sur les cycles économiques courts ont donné lieu à des tentatives de représenter les fluctuations de court terme comme des chocs

aléatoires (sur la productivité par exemple) le long d'une trajectoire optimale, mais elles ne constituent qu'une esquive du problème fondamental et se révèlent peu convaincantes, comme le reconnaît R. Solow :

> « 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, p. 310)

La stratégie adoptée pour l'élaboration d'Imaclim-R repose à la fois sur une architecture récursive et sur la représentation de certains mécanismes en cause dans les fluctuations de court terme : anticipations imparfaites, utilisation incomplète des facteurs de production, inerties à différents niveaux – équipements, techniques, préférences, flux commerciaux ou flux de capitaux. Pour ce faire, l'architecture du modèle est conçue sur deux principes (Figure 9) :

(i) chaque équilibre statique représente un bilan économique annuel (production, consommation, échanges internationaux) à travers un équilibre walrasien de l'économie mondiale ;

(ii) entre deux équilibres statiques successifs, des modules dynamiques représentent l'évolution des techniques et des stocks de facteurs de production (capital, travail, ressources naturelles), alimentant ainsi une croissance progressive entre chaque équilibre statique.

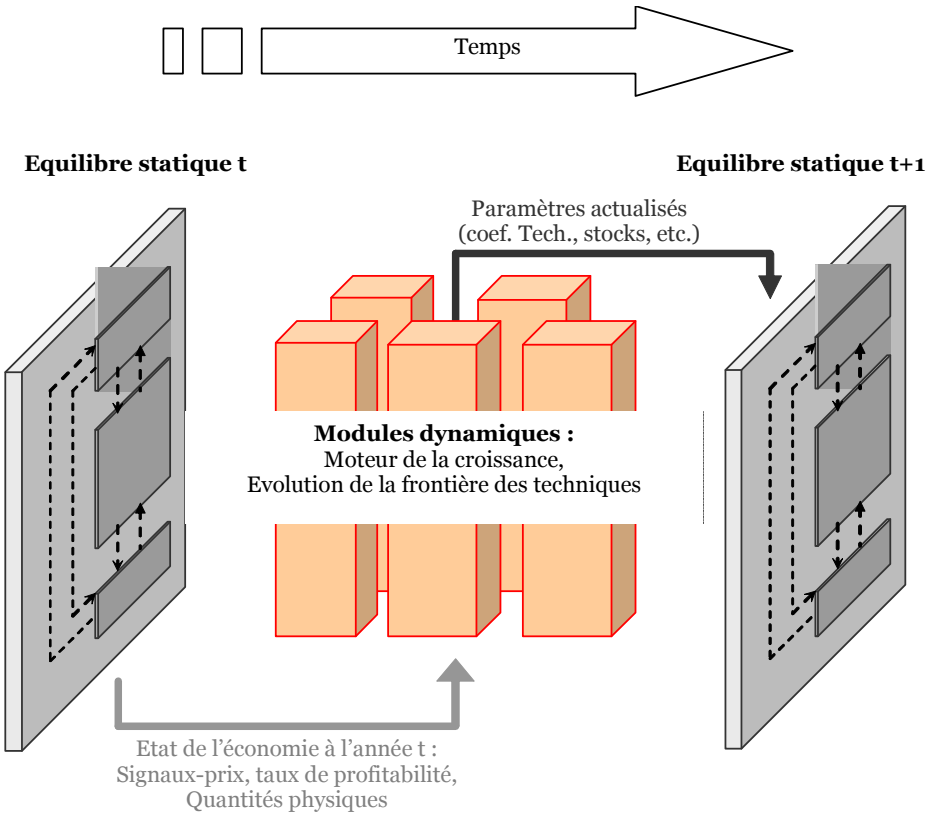


Figure 9 : Architecture récursive du modèle IMACLIM-R

Un point fondamental est que chaque équilibre statique ne décrit pas un optimum collectif de production compte tenu des techniques disponibles. Au contraire l'équilibre est contraint à une situation sous-optimale par différents choix de représentation :

- Une inadéquation entre l'appareil productif et la demande finale peut provenir d'allocations imparfaites des investissements entre secteurs et de l'inertie des équipements, entraînant par exemple des surcapacités de production dans certains secteurs et des sous capacités dans d'autres et créant ainsi des tensions sur les prix et les quantités ; une réallocation immédiate du capital, si elle était possible, permettrait de se rapprocher de l'optimum collectif avec le même état des techniques ;
- Les rigidités du marché du travail et les écarts en quantité et en qualité entre offre et demande de main d'œuvre empêchent d'accéder au plein emploi ;
- Les flux de capitaux n'obéissent pas à une règle d'égalisation universelle de la profitabilité marginale de l'investissement et ont un impact sur les termes de l'échange, la disponibilité de l'investissement, la demande finale de biens d'investissement ;
- Les taxes préexistantes peuvent créer des distorsions limitant les niveaux de production et d'utilité finale, lorsqu'elles ne visent pas à corriger des externalités négatives ;
- Certaines équations de comportement ne sont pas des équations d'optimisation du profit ou de l'utilité, mais reposent sur des routines de comportement ou des fonctions de parts empiriques.

Compte tenu de ces barrières, frictions ou routines de comportement, le point d'équilibre à une date donnée se situe en deçà de la frontière de production[56]. Sur la Figure 10, la frontière de production hypothétique à la date ❶ est représentée dans un espace à deux biens A et B. Compte tenu des contraintes sur l'équilibre statique listées ci-dessus, le point d'équilibre qui correspond est Eq_1. L'optimum de court terme se situe au point O_1, point de tangence de la frontière de production et de la courbe d'iso-utilité la plus élevée possible. L'écart entre le point d'équilibre Eq_1 et l'optimum O_1 peut ainsi être une source transitoire de croissance si les « barrières » sont levées ou corrigées au cours du temps. Dans l'intervalle entre les deux équilibres statiques ❶ et ❷ la frontière de production évolue sous l'effet du changement technique et de la dynamique des différents facteurs de production. Ce mouvement alimente la croissance globale du fait que l'espace des possibles ainsi agrandi permet aux agents économiques de se placer au nouvel équilibre Eq_2. La croissance réelle entre Eq_1 et Eq_2 pourra être plus ou moins grande que la croissance potentielle liée à l'extension de la frontière de production entre O_1 et O_2, en fonction de l'évolution des paramètres de l'équilibre statique (allocation des facteurs de production, réforme fiscale, etc.) et en particulier des barrières responsables des sous optimalités dans l'équilibre statique.

Avec cette représentation, des déséquilibres sont générés de façon endogène par *l'inertie* de l'adaptation à des conditions économiques changeantes, inertie qui freine un retour automatique et peu coûteux à un équilibre stationnaire. Comme à court terme la principale flexibilité disponible réside dans le taux d'utilisation des capacités installées, le modèle génère des excès ou pénuries en facteurs de production, des situations de sous-emploi et des taux de profitabilité inégaux entre secteurs. Sur le

[56] Ici nous définissons la frontière de production dans l'espace des biens produits, comme l'ensemble des combinaisons de biens produits avec les stocks de facteurs de production existants et les techniques existantes à cette date, comme Johansen (1972).

long terme, en l'absence de nouveaux chocs exogènes, les chemins de croissance produits par IMACLIM-R se rapprochent d'une trajectoire équilibrée « à la Solow ».

Cette modélisation n'est pas anodine car elle permet de mieux représenter les marges d'adaptation qui existent à court terme dans l'économie : celles-ci reposent en général moins sur un ajustement rapide des techniques utilisées dans l'économie que sur une variation des taux d'utilisation des facteurs de production, avec plus ou moins d'impact sur les niveaux de prix relatifs, selon les marchés. Cette représentation est cruciale pour l'évaluation des coûts de transition après un choc ou la mise en place d'une politique.

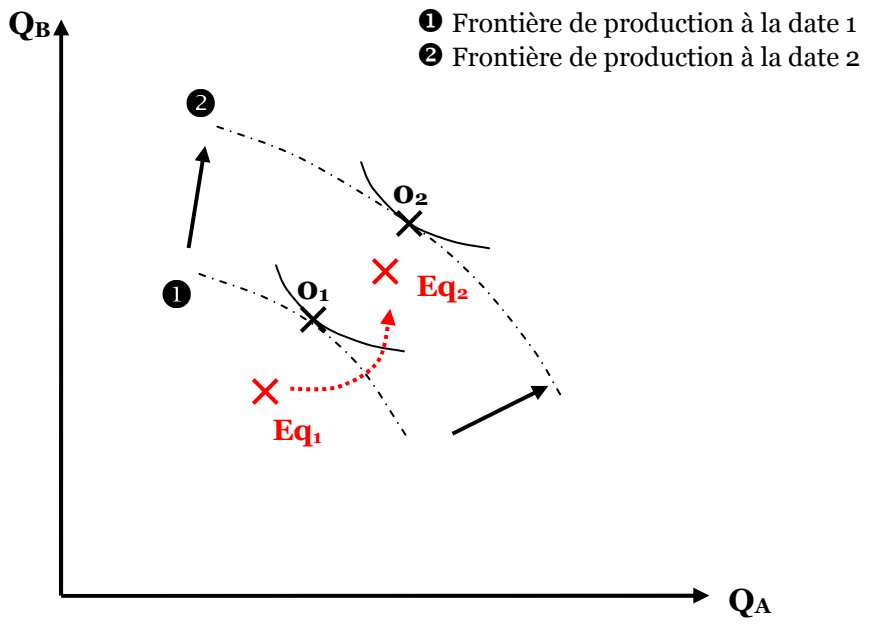


Figure 10 : Equilibres sous-optimaux et croissance potentielle

Dans IMACLIM-R, nous opérons ainsi une jonction entre (i) les modèles de croissance « cambridgiens », autorisant les déséquilibres à court-terme, à cause de rigidité des techniques (Harrod, 1939 ; Domar, 1946), de l'ajustement non-linéaire de l'épargne (Kaldor, 1940) ou de délais d'investissement (Kalecki, 1939), (ii) les modèles néoclassiques, dont le taux de croissance à long terme dépend uniquement de la démographie et du progrès technique.

1.2 L'évolution des univers techniques

La représentation des univers techniques sur un horizon de plusieurs décennies représente une gageure à laquelle les économistes répondent en général avec un degré d'abstraction élevé, en utilisant des grandeurs de « capital » et de « productivité des facteurs » peu tangibles (à travers des variables « subrogées », selon l'expression de Samuelson (1962)). Cette abstraction est d'ailleurs un des principaux obstacles au dialogue entre macroéconomistes et ingénieurs (cf. Chapitre 2, §2.1). Or, le problème du changement climatique nécessitant de représenter la dynamique des quantités *physiques* de gaz à effet de serre émises dans l'atmosphère et de faire dialoguer économistes et ingénieurs pour projeter des scénarios cohérents de l'économie future et de son contenu énergétique, il est impératif de modéliser conjointement le monde physique et le monde économique dans des termes tangibles.

Dans Imaclim-R, l'équilibre statique repose sur une représentation de l'économie à la fois en quantités physiques et en valeurs monétaires, les deux grandeurs étant reliées par le jeu des prix relatifs. Plus précisément, les quantités d'énergie sont toujours exprimées dans une unité commune (tonne équivalent pétrole). Les quantités des biens non énergétiques sont exprimées en quantités physiques réelles lorsque le niveau de désagrégation sectorielle le permet (passagers kilomètres, tonnes d'acier, etc) ou en index de volume lorsque le secteur considéré est trop large pour être assimilé à un bien cohérent unique (services, industrie manufacturière, etc.). La cohérence de notre approche dans la représentation des quantités physiques réelles et des rigidités à court terme des moyens de production nécessite aussi d'abandonner le concept néoclassique de « capital » en privilégiant la notion de « capacité de production », exprimée dans les mêmes unités que les quantités de biens. La description du monde physique est complétée autant que possible par les niveaux d'équipements des ménages – nombre de m^2 de logement par personne, nombre de véhicules pour 100 personnes – et par les stocks d'infrastructures (par ex. kilomètres de réseau routier).

Les variables physiques du modèle constituent le support central du dialogue entre économistes et ingénieurs parce qu'elles permettent (i) 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, (ii) de reproduire des relations empiriques sur l'efficacité des instruments économiques, les imperfections de marché, les contraintes institutionnelles et la rationalité limitée des comportements.

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 et 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 : en général la simple superposition des tables physiques et économiques fournit une matrice hybride avec des prix différenciés selon les agents économiques consommateurs et/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 base 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, des bilans énergétiques de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) et des données de transport de passagers fournies par Schäfer et Victor (2000) en nous obligeant à respecter les bilans physiques de l'AIE.

A partir de cette représentation explicite du monde physique, un choix crucial de modélisation réside dans l'abandon des fonctions de production conventionnelles KLE ou KLEM (Hourcade, 1993 ; Ghersi et Hourcade, 2006) dont nous avons discuté la pertinence dans le chapitre précédent (Chapitre 2, §2.1). Celles-ci sont censées reproduire de manière agrégée l'ensemble des technologies disponibles et des contraintes techniques qui s'appliquent sur une économie à un moment donné. En fait elles ne sont connues qu'au voisinage d'un point et c'est par extrapolation que l'économie néoclassique calibre une fonction de production complète, avec des paramètres d'élasticité exogènes et en considérant que le point connu constitue un optimum pour les prix relatifs courants. 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. Autrement dit, 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 styles de consommation, choix technologiques et schémas de localisation (Hourcade, 1993). Le modèle IMACLIM-R évite le recours à de telles fonctions en utilisant la structure récursive du modèle :

(i) **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 seuls leviers d'adaptation des producteurs résident dans leur 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.

(ii) **Dans les modules dynamiques**, la représentation explicite des marges de manœuvre techniques sectorielles permet de projeter les évolutions progressives des techniques et des capacités installées, en tenant compte des anticipations des agents concernant les signaux-prix futurs et la demande future, des capacités de financement disponibles et du progrès technique incrémental d'une année sur l'autre. A chaque date, les agents peuvent choisir de nouveaux équipements de façon flexible parmi un portefeuille de technologies disponibles ; ces choix induisent une modification à la marge des coefficients input-output et de la productivité globale, en tenant compte des technologies déjà incorporées dans les équipements existants, qui résultent des choix techniques passés. Ceci revient à une fonction de production « putty – clay », qui permet de représenter l'inertie des systèmes techniques. Les nouveaux coefficients techniques actualisés sont ensuite utilisés pour la résolution de l'équilibre statique suivant.

- La représentation du *changement* technique, résultat de l'interaction du *progrès* technique et des choix d'allocation des investissements à chaque date, repose ainsi principalement sur des modules dynamiques sectoriels qu'il est facile de faire évoluer. Ceux-ci incorporent, selon le degré d'avancement ou les besoins spécifiques de la modélisation, des sous-modèles sectoriels de complexité variable, allant de formes réduites compactes (par ex. secteur composite) à des algorithmes de choix optimal des investissements (par ex. secteur électrique). Ces modules sont le lieu privilégié d'introduction des dires d'expert, de routines de comportement, ou encore de résultats de modèles bottom-up plus spécialisés. Cette logique d'interaction entre équilibre général statique et modules technologiques sectoriels permet d'instaurer une hybridation étroite entre les visions bottom-up et top-down des univers techniques. Il est ainsi possible de vérifier que l'économie projetée encapsule une réalité technique plausible et, à l'inverse, que le système technique projeté correspond à une trajectoire économique cohérente, notamment en ce qui concerne les signaux prix et les flux d'investissements (Figure 11).

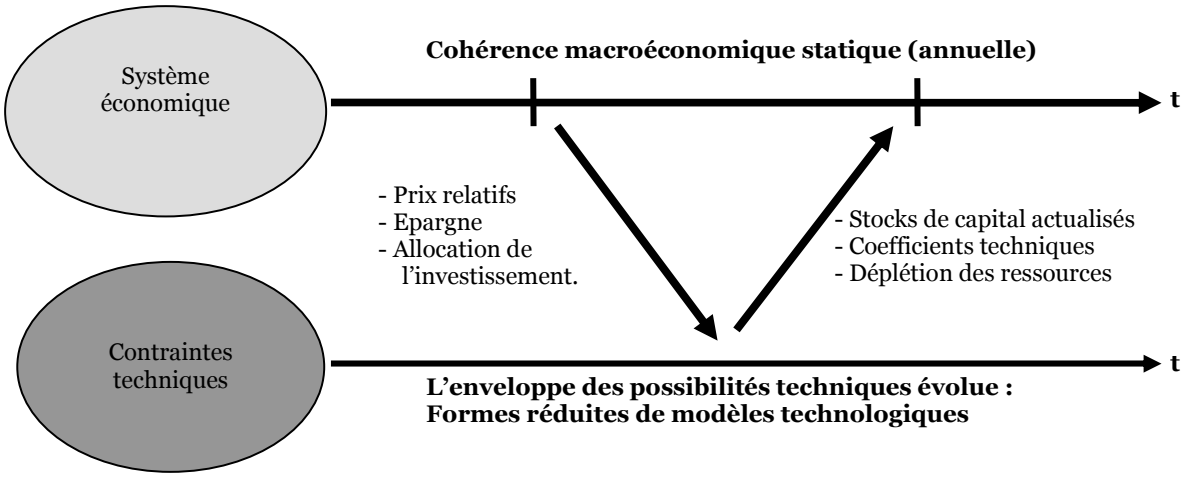


Figure 11: Un dialogue itératif « top-down / bottom-up »

1.3 Les modes d'anticipations et de décisions des agents économiques

Grâce au choix d'une architecture récursive et modulaire et à l'abandon du paradigme marginaliste pour la modélisation des secteurs productifs, le modèle IMACLIM-R permet aussi d'apporter des éléments de réponse au troisième volet de notre diagnostic sur les insuffisances des modèles concernant la représentation des anticipations et des décisions des agents. Cette réponse se décline en 2 étapes :

- **Dans l'équilibre statique**, les producteurs et les consommateurs prennent des décisions d'ajustements *instantanés* aux conditions de marché. Ces ajustements garantissent l'existence d'un équilibre général prix/quantités. Les marges de manœuvre pour ces décisions sont réduites à cause de la rigidité des équipements et des technologies en place. Ces décisions peuvent correspondre à une maximisation statique d'utilité ou des profits, ou bien à une routine de décision, par exemple en réaction aux variations de prix relatifs. Les investisseurs prennent des décisions d'allocation des ressources financières disponibles entre régions et secteurs, en fonction de routines d'allocation pouvant dépendre des taux de profitabilité espérés, des volumes d'investissement nécessaires pour assurer l'augmentation des capacités, de risques régionaux spécifiques, de stratégies d'influence des termes de l'échange, etc.

- **Les modules dynamiques** représentent par ailleurs les décisions itératives de tous les agents économiques concernant les choix d'investissement et de technologies. Cette représentation est plus ou moins désagrégée selon les agents considérés. La modularité de l'architecture Imaclim-R permet de tester différentes hypothèses sur la formulation des *anticipations*, entre myopie et anticipations quasi-parfaites[57], et des *décisions*, entre routines de décision et optimisation. La description des modules dynamiques sectoriels dans le chapitre suivant permettra de souligner l'étendue de ces possibilités.

[57] Pour mimer les anticipations quasi-parfaites, il faut faire tourner le modèle plusieurs fois sur toute la trajectoire désirée et remplacer, après chaque simulation, la séquence d'anticipations par les valeurs réalisées des variables. La convergence vers une trajectoire d'équilibre stable n'est pas garantie.

Le recours aux routines de décisions ou à des hypothèses d'anticipations imparfaites est une étape importante dans la remise en cause de l'usage systématique du paradigme de l'agent représentatif optimisateur pour représenter le monde réel. Au-delà des spécifications du modèle présenté dans cette thèse, qui traduisent l'état d'avancement des travaux à ce jour, cette architecture modulaire permettra aussi, dans des développements ultérieurs, de désagréger la demande finale en catégories de ménages ou de représenter séparément les activités du secteur informel, dont les caractéristiques sont différentes de celle des activités formelles (activités vivrières, différences de taux de préférence pure pour le présent, etc.).

1.4 Agrégation régionale, sectorielle et Données

Dans sa version actuelle, présentée ici, le modèle est fondé sur une désagrégation de l'économie mondiale en 12 régions et 12 secteurs productifs, dont le périmètre est rappelé dans le Tableau 8 et le Tableau 9, en lien avec le découpage de la base de données macroéconomique GTAP 6.

Tableau 8 : Agrégation régionale du modèle IMACLIM-R

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 9 : Agrégation sectorielle du modèle IMACLIM-R

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 intensives en énergie	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.
Composite	*Rest of sectors*

2 Description de l'Equilibre Statique

L'équilibre statique est un équilibre *walrasien* pour les secteurs de biens et de 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 : (i) maximisation de la fonction d'utilité du ménage représentatif de chaque pays ou région sous contrainte de budget, (ii) décisions des investisseurs concernant l'allocation des investissements entre secteurs, (iii) choix des entreprises concernant leur taux d'utilisation des capacités de production installées, (iv) routines de décision dans les politiques et dépenses publiques, (v) ajustements des flux commerciaux et de capitaux aux conditions économiques domestiques et internationales. Le calcul de l'équilibre détermine les prix relatifs, les salaires, la force de travail utilisée, les quantités de biens et services échangées et les flux de valeurs. A l'équilibre, toutes ces variables sont telles qu'elles satisfont les conditions d'équilibre des marchés pour tous les biens échangeables et toutes les contraintes de budget des agents et des régions. Le caractère dual – prix / quantités – de la représentation de l'économie permet d'imposer explicitement un principe de conservation en masse des flux physiques en parallèle de l'équilibre des flux monétaires. 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 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 départ, 2001.

2.1 Demande des ménages en biens et services

La demande finale des ménages est calculée par un programme de maximisation de l'utilité pour un consommateur représentatif par région[58]. 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).

2.1.1 Revenu et épargne

Le revenu des ménages de la région k est égal, comme indiqué dans l'équation (3.1), à la somme des salaires perçus dans tous les secteurs j de la région k (l'offre de travail est supposée 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 forfaitaires des administrations publiques. L'épargne des ménages est une proportion ($1\text{-}ptc_k$) de ce revenu, fixe dans l'équilibre statique (3.2).

[58] 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 et Kneip, 1999).

$$Income_k = \sum_j wages_{k,j} + \sum_j div_{k,j} \cdot profits_{k,j} + transfers_k \tag{3.1}$$

$$Savings_k = (1 - ptc_k) \cdot Income_k \tag{3.2}$$

2.1.2 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 $S_{k,mobility}$ (en kilomètres-passagers *pkm*), (iii) les services d'habitat $S_{k,housing}$ (en mètres carrés). Les besoins fondamentaux pour chaque bien et service sont notés *bn*.

$$U = \prod_{\substack{goods\ i \\ (agriculture, \\ industry, \\ services)}} \left(C_i - bn_i\right)^{\xi_i} \cdot \left(S_{\text{housing}} - bn_{\text{housing}}\right)^{\xi_{\text{housing}}} \cdot \left(S_{\text{mobility}} - bn_{mobility}\right)^{\xi_{\text{mobility}}} \tag{3.3}$$

Les consommations d'énergies finales ne contribuent pas directement à la formation de l'utilité et sont seulement considérées comme des intermédiaires dans 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 pesant sur le revenu réel disponible.

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

Le calcul de la consommation liée aux services de 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 terrestres publiques, le mode aérien, le mode automobile et les modes non motorisés (cycles, marche). Du fait des différences d'aménités fournies par chaque mode et en fonction des 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 service de mobilité, via une fonction à élasticité constante de substitution (CES).

$$S_{k,mobility} = \left(\left(\frac{pkm_{k,air}}{b_{k,air}} \right)^{\eta_k} + \left(\frac{pkm_{k,public}}{b_{k,public}} \right)^{\eta_k} + \left(\frac{pkm_{k,cars}}{b_{k,cars}} \right)^{\eta_k} + \left(\frac{pkm_{k,nonmotorized}}{b_{k,nonmotorized}} \right)^{\eta_k} \right)^{-1/\eta_k} \tag{3.4}$$

La raison pour laquelle nous ne faisons pas figurer l'énergie dans la fonction d'utilité est la volonté de représenter explicitement les équipements, les demandes induites par ces équipements, et l'évolution de leur efficacité énergétique. Ainsi, nous pouvons 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 des performances énergétiques des équipements. Les consommations d'énergies finales directement supportées par les ménages sont dérivées des niveaux de services $S_{k,housing}$ et $pkm_{k,cars}$ à travers l'équation (3.5):

$$C_{k,Ei} = pkm_{k,cars} \cdot \alpha_{k,Ei}^{Cars} + S_{k,housing} \cdot \alpha_{k,Ei}^{m^2} \tag{3.5}$$

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. La dynamique de ces paramètres prend en compte l'évolution de la consommation de services finaux par les ménages et les demandes en énergies finales qui leur sont associées.

2.1.3 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 propre utilité sous une double contrainte :

-
- Une **contrainte de revenu disponible** 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 (3.6), pour un vecteur donné de prix au consommateur $pC_{k,i}$,

$$ptc_k \cdot Income_k = \sum_i pC_{k,i} \cdot C_{k,i} + \sum_{Energies\ Ei} pC_{k,Ei} \cdot \left(pkm_{k,cars} \cdot \alpha_{k,Ei}^{cars} + S_{h,housing} \cdot \alpha_{k,Ei}^{m^2} \right) \tag{3.6}$$

- Une **contrainte de budget temps** impose un plafond supérieur au temps moyen quotidien consacré aux déplacements. Elle 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 dans un large éventail de zones urbanisées, malgré de larges substitutions de modes au cours des périodes étudiées. Le choix entre différents modes de transport dépend en fait non seulement de leurs prix relatifs mais aussi des 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 capacité maximale de chaque mode de transport change dans le temps en fonction de la quantité d'investissement affecté à chaque type d'infrastructure. La contrainte de budget temps s'écrit finalement[59] :

[59] En supposant une durée moyenne 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.

$$Tdisp_k = \sum_{means\ of\ transport\ T_j} \int_0^{pkm_{k,T_j}} \tau_{k,T_j}\left(\frac{u}{Captransport_{k,T_j}}\right)du \qquad (3.7)$$

2.2 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 $Q_{k,i}$ / $Cap_{k,i}$ des capacités installées. Cette spécification représente un écart significatif par rapport à la formulation 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 un certain nombre de secteurs, au delà d'un certain taux d'utilisation des équipements, le rendement diminue, ce qui amène 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 3). *A priori*, ces rendements décroissants sont suceptibles de concerner tous les inputs intermédiaires, y compris le travail. Pour des raisons de simplicité et suivant les ordres de grandeur dégagés par Corrado et Mattey (1997), nous supposons que la cause première de la hausse des coûts de production pour des taux d'utilisation 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, du recours à l'emploi par interim, des surcoûts du travail de nuit et de la croissance des besoins de maintenance. Nous supposons donc

(i) 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;

(ii) un paramètre de rendement décroissant dépendant du taux d'utilisation des capacités $\Omega_{k,i}=\Omega(Q_{k,i}/Cap_{k,i})$ et s'appliquant seulement aux salaires moyens à l'échelon du secteur[60] (3.9)

[60] 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.

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

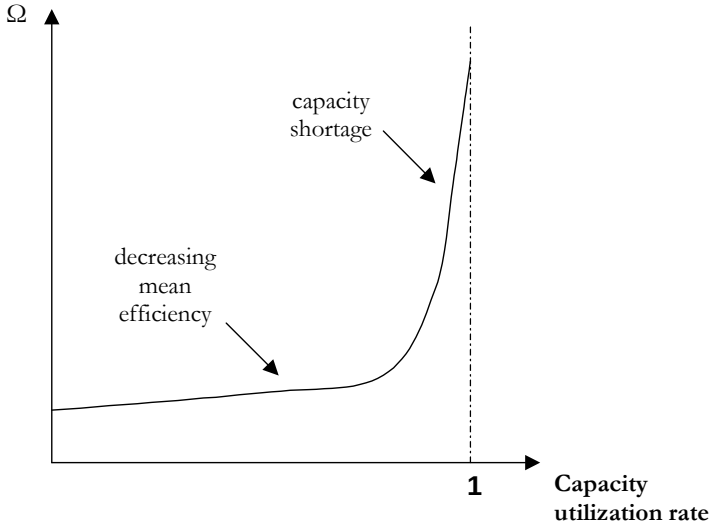


Figure 12 : Rendements statiques décroissants

Nous dérivons de ces hypothèses une expression des coûts de production moyens $Cm_{k,i}$ (3.8), en fonction des prix des biens intermédiaires $pIC_{j,i,hk}$,, des coefficients input-ouput $IC_{j,i,k}$ et $l_{k,i}$, des salaires de référence $w_{k,i}$, des taxes sur les salaires $tax^{w}_{k,i}$ et du niveau de production, via le facteur de rendement décroissant $\Omega_{k,I}$, appliqué aux coûts du travail.

$$Cm_{k,i} = \sum_{j} pIC_{j,i,k} \cdot IC_{j,i,k} + \left(\Omega_{k,i} \cdot w_{k,i}\right) \cdot l_{k,i} \cdot (1 + tax^{w}_{k,i}) \tag{3.8}$$

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 $\pi_{k,i}$ constant mais qui leur est propre (3.9), 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 (3.8) 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[61] mais dont la forme au voisinage de l'utilisation normale des capacités est très proche d'une fonction exponentielle.

[61] 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 la forme de la figure 3.

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

Cette équation représente en fait une courbe d'offre inversée, ce 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 (3.9) nous déduisons simplement les salaires et les profits pour chaque secteur:

$$wages_{k,i} = \left(\Omega_{k,i} \cdot w_{k,i}\right) \cdot l_{k,i} \cdot Q_{k,i} \tag{3.10}$$

$$profits_{k,i} = \pi_{k,i} \cdot p_{k,i} \cdot Q_{k,i} \tag{3.11}$$

2.3 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 $InvInfra_k$[62]. Les dépenses des administrations publiques $G_{k,i}$ sont supposées suivre la croissance de la population. Les décisions d'infrastructures $InvInfra_k$ 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 (3.12). 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 autres termes soit laissé 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 dépenses.

$$\sum \mathrm{taxes_k} = \sum_i G_{k,i} \cdot \mathrm{pG_{k,i}} + \mathrm{transfers_k} + InvInfra_k \tag{3.12}$$

2.4 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} :

$$\mathrm{z_k} = \frac{L_k^{act} - \sum_j l_{k,j} \cdot \mathrm{Q_{k,j}}}{L_k^{act}} \tag{3.13}$$

Le taux de chômage z_k a un effet de rétroaction décroissant sur les salaires de référence $w_{k,i}$ dans chaque secteur, selon une courbe formellement similaire à une courbe salaires chômage classique (Figure 4), dont on peut retrouver une discussion détaillée dans Blanchflower et Oswald (1995). En

[62] 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.

fait, cette courbe, dont on verra plus tard l'importance, peut être interprétée de multiples façons, notamment avec des considérations de pouvoir de négociation salariale, de rareté de l'offre de travail, etc. 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 la population employée dans le secteur formel et l'ensemble des individus 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 sectoriel des capacités installées du secteur (via le facteur de rendement décroissant Ω).

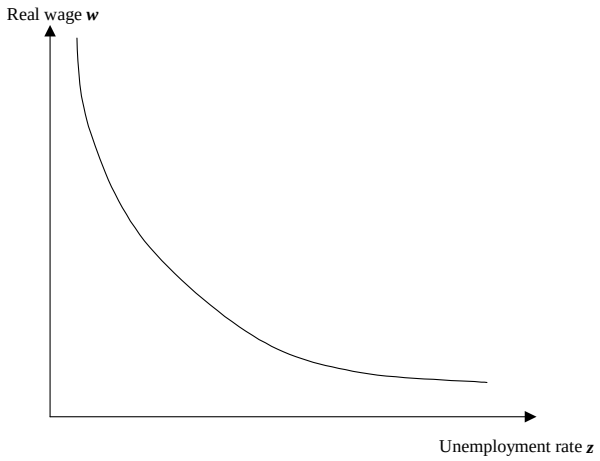


Figure 13 : courbe salaire-chômage

2.5 Flux de capitaux et investissements

2.5.1 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,* tels que 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 du changement technique. Comme l'ont déjà souligné McKibbin et al. (1998), 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 productions) sur les comptes courants, sur les investissements et finalement sur les prix relatifs.

Deux options de représentation des flux de capitaux ont été envisagées dans IMACLIM-R : soit ils observent une règle classique de stabilisation à long terme, typiquement la convergence des déséquilibres vers zéro en quelques décennies, soit ils obéissent à des règles endogènes d'allocation internationale des capitaux en fonction des profitabilités des secteurs dans les différentes régions, pour répondre au besoin de saisir les interactions importantes évoquées ci-dessus. Dans ce dernier cas, nous avons adopté les options de modélisation suivantes :

- Les ressources financières *domestiques* disponibles pour l'investissement sont égale à la somme de l'épargne et des profits non redistribués aux ménages.
-
- Pour déterminer leurs besoins de capacité, les entreprises forment des anticipations adaptatives sur les prix, les taux de profit et les demandes, en fonction des tendances passées et de la situation présente. A partir de ces anticipations, le modèle calcule 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 totale de financement. Les régions disposant d'un surplus de ressources financières sont supposées 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 ré-alloue la somme des contributions des régions en excédent à l'ensemble des régions en prenant en compte les demandes d'investissement non satisfaites dans les régions en déficit de financement, la profitabilité moyenne des investissements dans chaque région, ainsi que des risques-pays exogènes susceptibles de faire obstacle aux investissements directs étrangers.
-
- Les ressources financières nettes disponibles qui résultent de ces échanges, disponibles 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. Ces investissements impliquent l'achat de biens, la plupart étant fournis par les secteurs de la construction et de l'industrie (voir §2.5.2).
-
- 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 [63]. 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.

[63] Cette règle de comptabilisation, toujours vérifiée dans la réalité, est ici reproduite sans considérer certains 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.

Cette représentation permet de modéliser des situations de déséquilibre durable entre pays importateurs et pays exportateurs de capitaux. Par contre elle restera incomplète tant que l'évolution de la dette nationale des différents pays s'échangeant des capitaux ne sera pas représentée. Ce développement supplémentaire est actuellement entrepris dans le cadre d'une nouvelle thèse au sein de l'équipe de modélisation.

2.5.2 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 $pCap_{k,i}$ (3.14). Le coût unitaire $pCap_{k,i}$ dépend des quantités $\beta_{j,i,k}$ et des prix $pI_{k,j}$ des biens j requis pour la construction d'une nouvelle unité de capacité dans le secteur i et dans la région k (3.15). Le coefficient $\beta_{j,i,k}$ est la quantité de bien j nécessaire pour construire l'équipement correspondant à une unité de nouvelle capacité dans le secteur i de la région k. 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 de biens $I_{k,j}$ pour construire les nouvelles capacités productives (3.16).

$$\Delta Cap_{k,i} = \frac{InvFin_{k,i}}{pCap_{k,i}} \tag{3.14}$$

$$pCap_{k,i} = \sum_{j} \left(\beta_{j,i,k} \cdot pI_{k,j} \right) \tag{3.15}$$

$$I_{k,j} = \sum_{\text{sectors } i} \beta_{j,i,k} \cdot \Delta Cap_{k,i} \tag{3.16}$$

2.6 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 entre régions, ce qui n'est pas crucial pour l'objectif de nos simulations, contrairement aux modèles dédiés à l'étude du commerce international, tous les flux d'échange internationaux sont supposés transiter par un pool mondial. Pour chaque bien, la dynamique du commerce international dépend de deux variables :

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

Un problème bien connu des modélisateurs porte sur le moyen de traduire le fait que les biens produits dans des régions différentes coexistent sur le marché mondial 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 d'un même type mais 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 dans une fonction CES. Nous avons adopté cette spécification pour tous les biens non-énergétiques car elle 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.

On doit 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 supportent 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 biens très hétérogènes, et dont les indicateurs physiques ne sont pas directement utiles pour analyser les interfaces entre économie, énergie et environnement. En revanche, pour touts 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 dans le modèle, nous utilisons un modèle simple de 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 unique moyen. Ce prix mondial moyen satisfait un équilibre budgétaire du pool mondial pour chaque bien. 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[64].

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'importation $tax_{k,i}^{imp}$, et des coûts moyens de transport international associés à chaque biens[65] (3.17). 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.

$$p_{k,i}^{Imp} = wp_i \cdot \left(1 + tax_{k,i}^{Imp}\right) + wp_{it} \cdot nit_{k,i} \tag{3.17}$$

Par défaut, nous faisons l'hypothèse d'une poursuite du phénomène de globalisation de façon continue et stable. Les paramètres de commerce international correspondent ainsi à une compétition internationale soutenue.

[64] Les paramètres de la ventilation domestique/importé peuvent embarquer des informations sur l'existence de spécificités régionales telles que les réseaux commerciaux, les coûts d'approvisionnement, les préférences des consommateurs pour des biens produits au niveau national.

[65] La variable *wp* est ici le prix mondial du transport international et le paramètre *nit* est le besoin unitaire de transport international par bien échangé.

2.7 Contraintes d'équilibre sur les flux physiques

Les équations (3.18) et (3.19) sont des équations de bouclage des marchés en termes physiques ou quasi-physiques, respectivement pour les biens domestiques et importés[66]. Pour chaque bien, le volume du marché international X_i est égal à la somme de la demande de toutes les importations (3.20) et ce marché est fourni par les régions exportatrices selon les parts de marché MS^X (3.21).

$$Q_{k,i} = shareC_{k,i}^{dom} \cdot C_{k,i} + shareG_{k,i}^{dom} \cdot G_{k,i} + shareI_{k,i}^{dom} \cdot I_{k,i} + [\sum_j Q_{k,j} \cdot IC_{i,j,k} \cdot shareIC_{i,j,k}^{dom}] + X_{k,i} \quad (3.18)$$

$$M_{k,i} = shareC_{k,i}^{imp} \cdot C_{k,i} + shareG_{k,i}^{imp} \cdot G_{k,i} + shareI_{k,i}^{imp} \cdot I_{k,i} + [\sum_j Q_{k,j} \cdot IC_{i,j,k}^{imp} \cdot share_{i,j,k}^{imp}] \quad (3.19)$$

$$X_i = \sum_k \left(shareC_{k,i}^{imp} \cdot C_{k,i} + shareG_{k,i}^{imp} \cdot G_{k,i} + shareI_{k,i}^{imp} \cdot I_{k,i} + \sum_j shareIC_{i,j,k}^{imp} \cdot IC_{i,j,k} \cdot Q_{k,j} \right) \quad (3.20)$$

$$X_{k,i} = MS_{k,i}^X(t) \cdot X_i \quad (3.21)$$

2.8 Choix d'un numéraire

Les équations de l'équilibre statique laissent une indétermination car elles sont homogènes de degré 1 en valeur, c'est-à-dire qu'on peut obtenir une infinité de solutions « colinéaires » en multipliant tous les prix et les valeurs monétaires par un même scalaire et en laissant les quantités identiques. Pour fixer cette indétermination, nous choisissons de prendre comme numéraire le prix du bien composite aux USA, maintenu égal à un dans tous les équilibres.

2.9 Émissions de gaz à effet de serre et taxe carbone

2.9.1 Comptabilisation des émissions

Dans l'état actuel, le modèle ne comptabilise que les 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 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 biens produits : charbon, gaz naturel et produits raffinés. 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. Les émissions provoquées par la combustion de ces trois énergies finales sont obtenues à partir de la quantité physique d'énergie consommée via des

[66] 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.

coefficients qui reflètent leur contenu en carbone respectif. Ces coefficients valent respectivement 3.79, 2.82 et 2.07 tonnes de CO_2 par tep pour le charbon, les produits pétroliers et le gaz naturel. 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 puisque il sera rapidement oxydé naturellement.

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).

2.9.2 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 chimique 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 capture et séquestration du carbone (CCS). Dans ces secteurs, le coefficient d'émission doit être diminué de la fraction des émissions qui est évitée.
- Une part de besoins de carburants liquide peut être fournie par des biocarburants. Dans ce cas, le coefficient d'émission régional associé à la combustion d'une unité de carburants liquide est diminué pour ne prendre en compte pour les biocarburants que les émissions liées à leur transformation. Les émissions liées aux cultures végétales nécessaires sont comptabilisées via les consommations énergétiques du secteur agricole.

2.9.3 Taxe carbone

Dans le modèle, une taxe peut être prélevée sur les émissions de carbone issues de la combustion des énergies fossiles. Compte tenu du mode de comptabilisation des émissions à la consommation, la valeur de cette taxe peut être différenciée selon les secteurs de consommation et les régions du modèle. Cette taxe s'ajoute aux prix final d'achat du charbon, du gaz et des carburants liquides, en consommation intermédiaire et/ou en consommation finale. 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 un mode flexible : plusieurs spécifications sont possibles, comme un reversement direct aux ménages (*lump sum*) ou bien par exemple une substitution avec les charges pesant sur le facteur travail et la taxe carbone.

3 Modules dynamiques : Moteur de la croissance et Changement structurel

Dans le modèle, la dynamique de l'économie est liée à l'évolution des *paramètres* de l'équilibre statique, laquelle évolution est représentée dans les modules dynamiques intercalés entre les équilibres statiques successifs. La fonction de ces modules est de calculer les variations des technologies et des stocks (population, infrastructures, capacités de production, équipements, ressources) en fonction des signaux économiques et des états passés de l'économie. Le rythme et la direction de la croissance économique sont gouvernés par :

- **Le moteur de croissance**, alimenté par la démographie, les gains de productivité et l'évolution des capacités de production ; ces différentes tendances déterminent le taux *potentiel* de croissance, c'est-à-dire le déplacement de la frontière de production.
-
- **Le changement structurel *induit*** qui résulte de l'interaction entre les évolutions de la composition de la demande des ménages et l'évolution de l'appareil productif (productivité et capacité) ;
-
-
- **les changements techniques spécifiques** à l'offre et 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 interrégionaux. Cette section est limitée à la description du moteur de la croissance et du changement structurel, tandis que la description détaillée des modules dédiés au changement technique dans le secteur énergétique est renvoyée au chapitre suivant car ces modules constituent la partie la plus complexe de la dynamique du modèle.

3.1 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, (iii) d'hypothèses sur l'évolution des taux d'épargne.

3.1.1 Une dynamique démographique exogène

Comme dans la quasi totalité des modèles de prospective, les tendances démographiques sont des paramètres exogènes pour IMACLIM-R, elles sont calquées sur l'une des projections existantes dans la littérature (cf. chap. 2 §1.3.1) en fonction des besoins spécifiques à chaque exercice de modélisation. Le caractère exogène de cette tendance soulève plusieurs objections qu'il sera nécessaire de lever dans les développements ultérieurs du modèle, en collaboration avec des démographes :

- Les liens entre la croissance économique et le tempo de la transition démographique ;
- Les liens entre les inégalités de richesse, la persistance de pauvreté massive dans certains pays, et les flux migratoires ;
- Les liens entre changement climatique et flux migratoires, l'afflux de réfugiés climatiques étant l'un des facteurs de risque et de déstabilisation régionale bien identifié (German Advisory Council on Global Change, 2007).

Par ailleurs, la dynamique démographique ne se résume pas à une projection de la population totale. Il convient de disposer aussi d'informations cruciales concernant :

- L'évolution de la population *active*, qui détermine le niveau maximal de l'offre de main d'œuvre dans l'économie. Pour une représentation complète du niveau de main d'œuvre disponible, il faudra aussi projeter l'évolution de la durée du travail annuelle par personne en âge de travailler et l'évolution du taux d'emploi (c'est-à-dire la part de la population active qui se trouve sur le marché de l'emploi).
- L'état de la pyramide des âges, qui influe fortement sur l'évolution du taux d'épargne agrégé des ménages.
- La part de la population active non employée qui est en situation de création de richesse ou de satisfaction des besoins de base dans le secteur informel : cultures vivrières, activités illicites ou non déclarées.

Dans cette thèse et dans la version actuelle du modèle, ces besoins ont été satisfaits de manière partielle, en utilisant les projections de l'ONU pour la population totale et la population en âge de travailler (cf. chapitre 5, § 1.1.1). L'étude des liens entre croissance et démographie, l'endogénéisation des flux migratoires, ou encore l'examen des questions de secteur informel et de pyramide des âges ont été reportés à des travaux ultérieurs.

3.1.2 L'évolution de la productivité des facteurs

Dans l'équation (3.8) donnant les coûts moyens de production dans l'équilibre statique, la productivité du travail est un paramètre explicite, à travers la grandeur *l*, qui donne la quantité de travail nécessaire à la production d'une unité de chaque bien. La productivité du travail évolue donc à l'inverse du paramètre *l*, c'est un paramètre de productivité « physique » sectorielle.

Les mécanismes qui induisent une évolution de ce paramètre sont multiples : amélioration des pratiques, optimisation du management, amélioration de l'information, nouvelles technologies, meilleure formation des travailleurs, amélioration des conditions de travail etc. Le niveau des technologies ne constitue qu'un déterminant parmi d'autres de la productivité des secteurs intensifs en travail (Baily et Solow, 2001). Certains de ces mécanismes peuvent concerner l'ensemble de l'appareil productif d'un secteur, tandis que d'autres ne jouent un rôle qu'à condition de modifier ou de renouveler les installations de production. Dans la majorité des études portant sur l'évolution de la productivité, ces considérations sont masquées par le fait que l'on s'intéresse à la valeur *agrégée* de la productivité (cf. chapitre 2, §1.3.1). Nous disposons donc de peu d'informations sur la part des différents mécanismes dans la dynamique d'ensemble de la productivité du travail. On raisonne donc, dans le modèle IMACLIM-R comme dans la littérature économique, sur le paramètre *l* tout entier, sans distinction des gains de productivité qui concernent seulement les nouvelles technologies encapsulées dans le capital nouvellement installé de ceux qui s'étendent à l'ensemble du secteur.

Il est possible d'appliquer au paramètre *l* les principes de modélisation que nous avons dégagés au chapitre 2 : d'une part, raisonner sur la productivité physique et non la productivité monétaire, d'autre part, représenter les dynamiques de rattrapage et de convergence au niveau sectoriel et non pas au niveau de l'économie toute entière. Les études portant sur l'évolution des productivités sectorielles, majoritairement limitées aux pays de l'OCDE pour des questions de disponibilité des données, mettent en évidence des dynamiques plus complexes que les faits stylisés agrégés qui se dégagent des travaux sur la convergence (Abramovitz, 1986) :

- Sur la période 1970-1990[67], certains secteurs, comme les services, montrent un rattrapage continu tandis que d'autres semblent caractérisés par l'absence de convergence (c'est le cas de l'agriculture ou de la construction) voire une certaine divergence, comme dans les industries manufacturières (Bernard et Jones, 1996). L'augmentation de la part des services dans l'économie et la convergence effective de la productivité dans ce secteur en particulier expliquent la convergence observée au niveau global par Barro et Sala-i-Martin (1992).

- Le degré d'ouverture des secteurs semble jouer un rôle important dans l'existence d'une convergence : Bernard et Jones (1996) rejoignent Krugman (1987) dans leur distinction entre « tradable goods » et « non-tradable goods » : selon eux, les secteurs peu concernés par le commerce international font l'objet d'une convergence sous l'effet d'une diffusion progressive de techniques identiques, tandis que les secteurs très exposés sont rapidement restructurés par une spécialisation internationale qui maintient des écarts de productivité importants.

- Le secteur manufacturier et celui des services se distinguent aussi sur deux points qui sont liés à l'existence d'un rattrapage : la vitesse observée des gains de productivité et l'ampleur des écarts de productivité entre pays. Dans le secteur manufacturier, un certain rattrapage a bien eu lieu, mais sans permettre une convergence observable, du fait de gains de productivité rapides chez les leaders et d'un faible écart de productivité absolue entre régions. Du côté du secteur des services, les écarts de productivité étaient plus importants, ce qui peut expliquer que les forces de convergence aient été plus dynamiques.

Ces nuances corroborent la nécessité déjà mentionnée au chapitre 2 de passer à une représentation sectorielle des dynamiques de convergence de la productivité. Pour projeter l'évolution future des productivités sectorielles, le point de départ est de contrôler le plus rigoureusement possible les niveaux de productivité initiaux issus du calibrage de base du modèle. Ce calibrage est réalisé en croisant les données de quantités physiques ou quasi-physiques issues de la matrice entrées-sorties hybride, et les données d'emploi sectoriel fournies par le Bureau International du Travail (ILO).

Tableau 10 : Calibrage des niveaux de productivité du travail pour les secteurs 1 à 6 (index 1 pour les USA)

	Charbon	Pétrole	Gaz	Raffinage	Electricité	BTP
USA	**1.00**	**1.00**	**1.00**	**1.00**	1.00	**1.00**
Canada	0.37	0.60	0.98	0.90	**1.82**	**1.02**
Europe	0.16	0.38	0.19	0.84	0.44	0.53
OCDE Pacifique	0.74	0.45	0.43	0.58	1.13	0.53
CEI	0.13	0.10	0.33	0.08	0.14	0.38
Chine	0.07	0.08	0.35	0.05	0.22	0.25
Inde	0.19	0.04	0.05	0.33	0.16	0.11
Brésil	0.11	0.04	0.02	0.05	0.06	0.25
Moyen Orient	0.26	0.60	0.69	0.29	0.23	0.19
Afrique	0.07	0.05	0.19	0.11	0.07	0.12

[67] On retrouve les mêmes observations en élargissant la période jusqu'en 2005 (Jiang, 2008).

Reste Asie	0.13	0.23	0.28	0.24	0.27	0.13
Reste Amérique	0.30	0.29	0.30	0.23	0.29	0.20

Tableau 11 : Calibrage des niveaux de productivité du travail pour les secteurs 7 à 12 (index 1 pour les USA)

	Composite	Transport Air	Transport Mer	Transport Terrestre	Agriculture	Industrie
USA	**1.00**	1.00	1.00	1.00	**1.00**	**1.00**
Canada	0.66	**2.06**	**1.30**	**1.61**	0.56	0.73
Europe	0.57	**1.99**	1.02	0.77	0.40	0.57
OCDE Pacifique	0.57	1.38	0.65	1.04	0.51	0.80
CEI	0.17	0.33	0.18	0.50	0.15	0.40
Chine	0.14	1.61	0.29	0.36	0.02	0.56
Inde	0.05	0.55	0.22	0.46	0.03	0.12
Brésil	0.15	0.41	0.27	0.31	0.27	0.33
Moyen Orient	0.13	0.40	0.23	0.64	0.07	0.21
Afrique	0.07	0.30	0.29	0.25	0.03	0.12
Reste Asie	0.08	0.66	0.51	0.55	0.06	0.13
Reste Amérique	0.17	0.91	0.52	0.56	0.13	0.31

A partir de ce calibrage pour l'année de référence en 2001, nous formulons des hypothèses dynamiques sectorielles concernant l'étendue et la vitesse du rattrapage, pour calibrer les paramètres des équations endogènes de rattrapage sectoriel. Certains secteurs sont supposés être exposés uniquement à un rattrapage partiel, à cause de spécificités régionales (par ex. la productivité agricole de la Chine n'est pas supposée rattraper celles des Etats-Unis, à la fois à cause de la nature des terres et des cultures mais aussi pour des raisons politiques de maintien de l'emploi agricole en Chine) ou à cause du degré d'exposition de chaque secteur à la concurrence internationale. Ces hypothèses constituent à elles deux le scénario de croissance de la productivité des régions (cf. chapitre 5, §1.1.2). L'équation (3.22) détermine l'évolution des productivités sectorielles selon une formule mathématique inspirée de l'équation de rattrapage global contenue dans le modèle INGENUE (CEPII, 2006).

$$\frac{A_{k,j,t}}{A_{k,j,t-1}} = \frac{A_{leader,j,t}}{A_{leader,j,t-1}} \cdot \left(\frac{A_{leader,j,t-1} \cdot Lev_{j,k}}{A_{k,j,t-1}} \right)^{\lambda} \tag{3.22}$$

Dans cette équation, la grandeur $A_{k,j,t}$ correspond à la productivité du travail dans le secteur j de la région k à la date t, c'est-à-dire à l'inverse du paramètre $l_{k,j}$ mentionné ci-dessus. Deux paramètres permettent de traduire les hypothèses d'étendue et de vitesse du rattrapage :

- Le paramètre λ est le taux annuel de rattrapage de l'écart entre la région leader dans ce secteur et la région considérée. Il est en général compris entre 0.5% et 3% par an.
- Le paramètre *Lev* est le niveau de rattrapage ultime entre chaque région et le leader, pour chaque secteur. Il est pris égal à 0.5 pour les secteurs les moins concernés par la convergence et égal à 1 pour les secteurs censés converger totalement. Pour explorer les incertitudes sur la croissance future, il est possible de faire varier ces valeurs « ad hoc » puis d'analyser les intervalles d'incertitude sur la productivité globale et la croissance réelle qui découlent de ces variations.

Dans les travaux de cette thèse, l'évolution de la productivité du travail est exogène, elle fait partie des « ingrédients » des scénarios. Dans d'autres travaux réalisés avec IMACLIM-R, cette évolution a été rendue endogène, afin de prendre en compte les effets de rétroaction des politiques énergétiques ou climatiques sur le changement technique (Crassous et al., 2006, Sassi, 2008)

La croissance de la productivité du travail est associée à une phase d'intensification du capital par travailleur (*capital deepening*). Mais le sens de ce mécanisme n'est pas le même dans le modèle néoclassique (avec une fonction de production flexible incorporant un agrégat de capital *monétaire)* ou dans notre modèle. Avec la définition du capital retenue ici comme *capacité physique de production*, il est évident que si la quantité de travail par unité de production diminue, alors la quantité de travail par unité physique de capacité de production diminue aussi, si l'on ne tient pas compte des fluctuations de court terme qui peuvent être liées aux variations de taux d'utilisation. Ceci n'est que pure logique. Par contre les gains de productivité peuvent être liés à une évolution radicale des équipements constituant les capacités de production, évolution susceptible de modifier le prix d'une unité de capacité et donc le ratio entre capital monétaire et capacité physique de production. Par exemple, dans une phase d'intensification de l'agriculture, la croissance de la productivité du travail est liée à un équipement massif en outils de production mécanisée. Il est difficile d'évaluer comment évolue le ratio entre investissement monétaire et augmentation de capacité de production. Dans IMACLIM-R ce ratio est lié aux prix relatifs courants des biens d'investissement et aux valeurs de la matrice β. Les prix sont endogènes au modèle mais il reste une incertitude sur l'évolution des coefficients de la matrice β. Faut-il acheter de plus en plus de biens pour construire *une* unité de production ? La littérature est quasi silencieuse sur ce sujet, du fait que le capital n'est quasiment jamais mesuré en unités physiques. Dans nos simulations, par défaut, nous maintenons constantes les valeurs de la matrice β.

Enfin, la hausse de la productivité du travail est en général accompagnée d'une hausse des salaires. Cette évolution parallèle dépend énormément du contexte institutionnel, du partage des gains entre travailleurs et capitalistes, des règles du marché du travail. Dans le modèle nous supposons, par défaut, que cette évolution se réalise conjointement. Pour le représenter, nous supposons que la courbe salaire-chômage est translatée chaque année en fonction des gains de productivité horaire, de manière à ce que le salaire moyen augmente comme la productivité pour un chômage maintenu au même niveau.

3.1.3 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 non distribués aux ménages. Ce partage de la valeur ajoutée entre consommation et 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 ($1\text{-}div_k$), maintenu constant, qui s'applique aux profits des secteurs productifs.

A ce jour, la trajectoire exogène des taux d'épargne régionaux est informée par des faits stylisés provenant du modèle macroéconomique INGENUE (CEPII, 2006). Ce modèle décrit la formation endogène de l'épargne à partir des dynamiques démographiques (évolutions des pyramides des âges régionales) et économiques (besoins de financement des systèmes de retraites et des flux internationaux de capitaux). Un des résultats du modèle est l'évolution à la baisse des taux d'épargne régionaux, reflétant un phénomène général de vieillissement des populations. L'intensité de cette baisse dans IMACLIM-R dépend à la fois des niveaux de départ (Tableau 12) 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 et d'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 de leur taux d'épargne.

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 démographie et croissance économique.

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 12 : Taux d'épargne régionaux à l'année de référence

Une fois fixés les déterminants démographiques et économiques de la croissance de long terme, 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 lorsque celui-ci est rendu endogène.

Comme nous l'avons décrit à la section 2.5, 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 dans l'économie à la période $t+1$. Ces nouvelles capacités incorporent les technologies les plus récentes, selon des modalités de choix technique que nous décrivons en détail dans le chapitre suivant.

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 (3.23).

$$Cap_{k,i}(t+1) = Cap_{k,i}(t).\left(1 - \frac{1}{Life_time_{k,i}}\right) + \Delta Cap_{k,i} \qquad (3.23)$$

L'évolution de l'ensemble des techniques de production encapsulées dans le stock de capital s'effectue selon une spécification « putty clay » : le choix techniques s'effectuent sans contrainte d'inertie pour les nouveaux investissements puis sont ensuite figés dans le capital installé et ne peuvent être modifiées ensuite. 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 $IC_{k,i}$ au cours du temps dépend donc de leur valeur courante et de leur nouvelle valeur caractéristique des nouvelles capacités construites $IC_new_{k,i}$. La loi dynamique d'évolution est donnée dans ce cas par la moyenne pondérée des deux valeurs :

$$IC_{k,i}(t+1) = \frac{IC_{k,i}(t) \cdot Cap_{k,i}(t).\left(1 - \frac{1}{Life_time_{k,i}}\right) + IC_new_{k,i} \cdot \Delta Cap_{k,i}}{Cap_{k,i}(t+1)} \tag{3.24}$$

Pour les secteurs dont les changements techniques sont décrits avec plus de précision, comme le secteur de l'électricité, de l'industrie, de l'agriculture, des services ou encore les stocks de véhicules, la loi de dépréciation exponentielle est remplacée par une spécification en génération imbriquées de capital (3.25). Cette représentation permet de mieux analyser l'inertie caractéristique de certains secteurs. Nous ne l'appliquons pas systématiquement à tous les secteurs par souci de simplicité et de maîtrise de la taille du modèle.

$$Cap_{k,i}(t+1) = \sum_{j=1}^{life_time_{k,i}} Cap_{k,i}^{vintage}(t+j) \tag{3.25}$$

où $Cap_{k,i}^{vintage}(t + life_time_k) = \Delta Cap_{k,i}$ correspond à la nouvelle génération de capital constituée des nouvelles capacités construites à la période *t*. Le paramètre $life_time_{k,i}$ 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 $Cap_{k,i}^{vintage}(t)$.

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 $t+j-Life_time_{k,i}$ (où *t* est la période courante) est notée $IC_{k,i}^{vintage}(t+j)$. 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 aux générations encore installées :

$$IC_{k,i}(t+1) = \frac{\sum_{j=1}^{life_time_{k,i}} Cap_{k,i}^{vintage}(t+j) \cdot IC_{k,i}^{vintage}(t+j)}{\sum_{j=1}^{life_time_{k,i}} Cap_{k,i}^{vintage}(t+j)} \tag{3.26}$$

3.2 Changement structurel

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

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. Babiker et al. (2001) rapportent ainsi 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 la demande adressée aux différents secteurs et des vitesses relatives des gains de productivité qui déterminent les coûts de production unitaires des différents biens et services. D'un côté, l'évolution de la demande totale dépend elle-même des préférences des ménages, de la demande de biens d'investissements en fonction du changement technique, de la position de chaque région sur les marchés internationaux. De l'autre côté, les gains de productivité dans chaque secteur modifient les prix relatifs de biens et déplacent progressivement les équilibres entre offre et 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. Lorsqu'il s'agit de fonctions homogènes de degré un, les parts de budget restent constantes pour des prix relatifs stables. Dans tous les cas, nous n'avons aucune assurance sur la robustesse de ce calibrage 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 fragilise la plausibilité lorsque l'on extrapole sur plusieurs décennies. L'usage répandu de cette commodité de calcul masque le fait qu'elle est seulement acceptable à court terme.

Pourtant, le soin apporté à l'élaboration des schémas d'évolution de la demande finale est déterminant pour l'analyse de l'interface croissance-énergie-environnement sur le long terme, puisqu'un mécanisme essentiel au cœur de cette interface est la potentielle saturation 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) tout aussi déterminants pour la durabilité des trajectoires. Pour améliorer la représentation de ces phénomènes, 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 déterminantes :

-

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 (3.3), 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 des simulations, 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. La baisse de consommation finale des biens agroalimentaires est supposée se reporter vers le secteur des services : toute variation du paramètre $\xi_{agriculture}$ est contrebalancée par l'évolution opposée sur le paramètre $\xi_{composite}$. Ce processus de diminution de la part des dépenses agroalimentaires dans le budget des ménages va toucher en particulier les régions hors de l'Annexe 1 alors que les régions de l'Annexe 1, dans lesquelles la part des biens agroalimentaires est déjà beaucoup plus faible, sont supposées conserver des parts de budget plus stables sur la période de simulation. 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 riches.

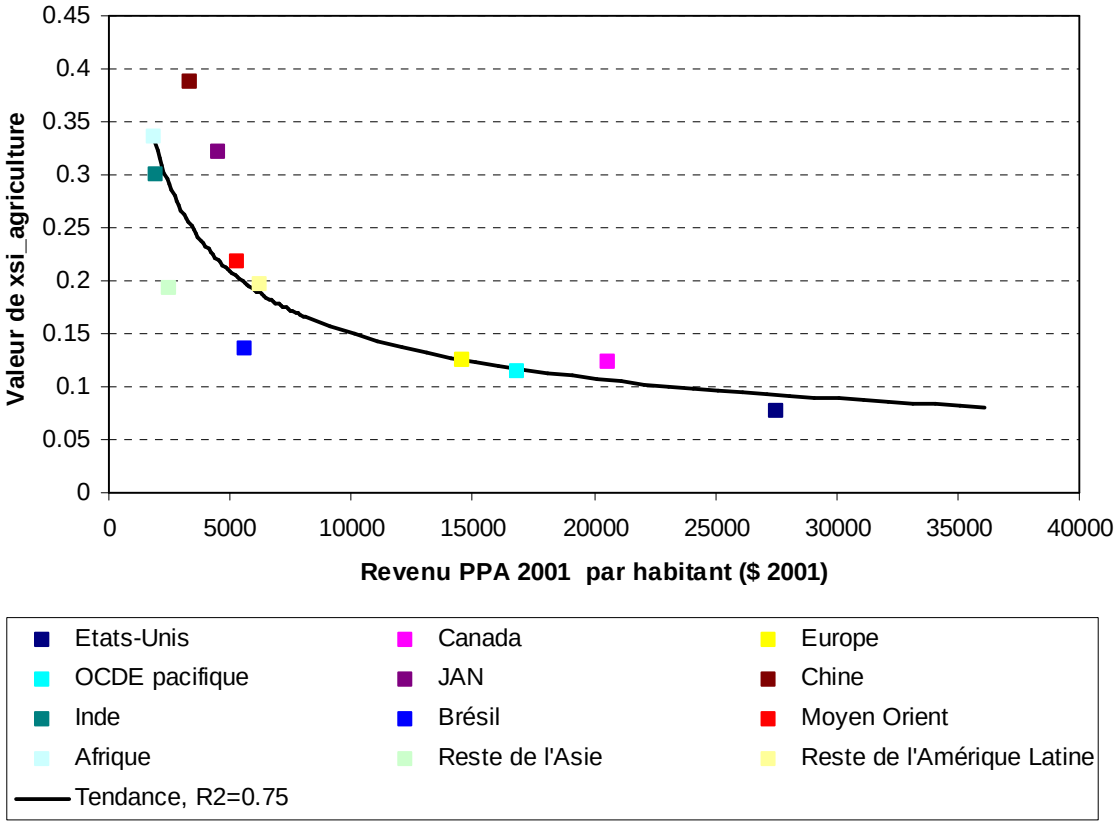


Figure 14 : Valeurs (Revenu PPA par habitant, $\xi_{agriculture}$) pour les douze régions du modèle à l'année de référence et courbe de tendance estimée.

Le niveau de consommation finale en produits manufacturés par habitant peut atteindre des asymptotes de saturation. Ces asymptotes sont exprimées en quantités quasi-physiques 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 peuvent être différents pour chaque région, ce sont des variables exogènes. Au cours de la trajectoire, dès que la consommation des ménages se rapproche de l'asymptote, le paramètre $\xi_{industrie}$ de la fonction d'utilité est ajusté pour conserver la consommation de 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 aussi répercutée de manière opposée 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 impactent durablement la géographie des territoires et créent des effets d'asymétrie dans les variations de la consommation de transport et la répartition modale. Cette constatation s'appuie sur les travaux de Kenworthy et Laube (1999) qui démontrent, en s'appuyant sur une 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. Comme 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. Dans IMACLIM-R, ces évolutions sont traduites par une 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 nouveauxbesoins 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 inertie pour refléter le temps caractéristique, très long, des réaménagements urbains et des changements d'usage.

4 Conclusion

Ce chapitre donne une présentation générale du modèle hybride IMACLIM-R. Il présente les choix de modélisation servant de base pour son architecture modulaire et adaptable, conçue pour répondre aux besoins multiples et évolutifs d'une équipe de modélisation prospective et travaillant en particulier sur les politiques énergétiques et climatiques. Ce même chapitre montre aussi 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 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, 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 sus du choix d'une représentation physique complète, l'originalité d'IMACLIM-R par rapport aux modèles existants repose sur deux innovations importantes qui tentent de répondre à une partie des insatisfactions développées dans le chapitre précédent :

- 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 de l'évolution conjointe de tous les coefficients techniques. Cette représentation n'est plus conditionnée aux valeurs des paramètres d'élasticité des fonctions de production ou d'utilité, elle repose sur des formes réduites de modèles détaillés ; autrement dit elle est confiée à la partie « bottom-up » du modèle, qui sera décrite dans le chapitre suivant.

- La possibilité d'une utilisation partielle des facteurs de production existants. Cette possibilité permet de représenter les canaux de propagation 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, inadéquation entre les technologies installées et les prix observés des énergies, etc.) et des barrières de *long terme* quand les possibilités de croissance sont bornées par des limites de convergence sectorielle, une insuffisance de ressources pour investir 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 comme interaction entre les changements de modes de consommation (C), les évolutions technologiques (T) et les choix de localisation des activités (L). Nous retrouvons là un fil rouge des travaux réalisés au CIRED depuis plusieurs décennies (Hourcade, 1984), nous invitant à penser l'évolution du monde comme interaction dynamique plutôt que comme projection « déroulante » de trajectoires exogènes de croissance et de changement technique. Les fortes inerties dans l'évolution des systèmes interviennent de façon centrale dans la formation des coûts des changements 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 de la capacité de notre approche à *hybrider* une analyse en équilibre général avec des informations sectorielles.

Références

Abramovitz, M., 1986, “Catching up, Forging Ahead, and Falling Behind”, *Journal of Economic History*, XLVI, 2, 385-406

Armington, P. S., 1969, “A Theory of Demand for Products Distinguished by Place of Production”, *International Monetary Fund Staff Papers*, 16, 170-201

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

Baily, M. N., Solow, R. M., 2001, “International Productivity Comparisons Built from the Firm Level”, *Journal of Economic Perspectives*, 15(3), 151-172

Barro R. J., Sala-i-Martin X., 1992, “Convergence”, *Journal of Political Economy*, 100(21), 223-251

Bernard, A.B., Jones, C.I., 1996a, “Comparing apples to oranges: productivity convergence and measurement across industries and countries”, *American Economic Review*, 86, 1216–1252

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

CEPII, 2006, “World Growth and International Capital Flows in the 21st Century”, Document de travail OFCE, n° 2006-07, avril.

Corrado, C., Mattey, J., 1997, “Capacity Utilization”, *Journal of Economic Perspectives*, 11(1), 151-167

Crassous, R., Hourcade, J.-C., Sassi, O., 2006, “Endogenous structural change and climate targets. Modelling experiments with Imaclim-R”, *The Energy Journal*, Special Issue n° 1, 259-276

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

German Advisory Council on Global Change, 2008, “World in Transition – Climate Change as a Security Risk”, Report from WBGU to the German Federal Environment Minister, Earthscan, London, 248 p.

Ghersi, F., 2003, Changement technique et double dividende d’écotaxes : un essai sur la confluence des prospectives énergétique et macro-économique, Thèse de Doctorat, EHESS, Hourcade, J.-C. (dir.), Paris, 289 p.

Ghersi, F., Hourcade, J.-C., 2006, “Macroeconomic Consistency Issues in E3 Modeling: The Continued Fable of the Elephant and the Rabbit”, *The Energy Journal*, numéro spécial Hybrid Modeling of Energy-Environment Policies: reconciling Bottom-up and Top-down : 39-62

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

Hildenbrand, W., Kneip, A., 1999, “Demand aggregation under structural stability”, *Journal of Mathematical Economics*, 31, 81-109

Hourcade, J.-C., 1984, “Prospective de l'énergie et stratégies de développement dans le tiers monde”, Thèse de Doctorat d'Etat en Sciences Economiques, Université Paris VIII Vincennes à Saint-Denis, octobre.

Hourcade, J.-C., 1993, “Modelling long-run scenarios : Methodology lessons from a prospective study on a low CO_2 intensive country”, *Energy Policy*, 21(3), 309-326

Jiang, S., 2008, “Macroeeconomic determinants of long run emissions”, stage de Master II, CIRED, 99 p.

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

Johansen, L., 1972, *Production functions: An integration of micro and marco, short run and long run aspects*, North-Holland, Amsterdam, 274 pp

Kaldor, N., 1940 "A Model of the Trade Cycle", *Economic Journal*, 50, 78-92

Kalecki, M., 1939, *Essays in the Theory of Economic Fluctuation*, 1972 edition, London: Allen and Unwin

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, 691-723

Krugman, P., 1987, "The Narrow Moving Band, the Dutch Disease, and the Competitive Consequences of Mrs. Thatcher", *Journal of Development Economics*, 27(1-2), 41-55

McKibbin, W. J., Wilcoxen, P. J., 1998, "The theoretical and empirical structure of the G-Cubed model", *Economic Modelling*, 16(1), 123-148

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

Samuelson, P. A., 1962, "Parable and Realism in Capital Theory: The Surrogate Production Function", *Review of Economic Studies*, 29(3)

Sands, R.D., Miller, S., Kim, M.-K., 2005, "The Second Generation Model: Comparison of SGM and GTAP Approaches to Data Development", PNNL report no. 15467 prepared for the United States Environmental Protection Agency

Sassi, O., 2008, "L'impact du changement technique endogène sur les politiques climatiques", Thèse de Doctorat : Sciences Economiques : Hourcade J-C (dir.), Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 278 pp.

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

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

Zahavi Y., Talvitie A., 1980, "Regularities in Travel Time and Money Expenditures", *Transportation Research*, 750, 13-19

Chapitre 4

IMACLIM-R :
Modules technico-économiques sectoriels hybridés dans un cadre d'équilibre général.

'methodological opportunism can be uncomfortable and unsettling; but at least it should be able to protect us from foolishness' (Robert. Solow, 1988, p. 311)

Les modules dynamiques du modèle Imaclim-R constituent le lieu privilégié de l'intégration des informations technico-économiques. Ils consistent en effet à représenter les évolutions de toutes les contraintes du système économique : choix d'investissements, nouvelle frontière des techniques, dynamique des équipements et actualisation des stocks de ressources. La structure du modèle laisse toute latitude au modélisateur pour représenter ces règles de comportement – niveau de précision, formes fonctionnelles, paramétrage – contrairement aux modèles d'équilibre général traditionnels, dans lesquels le recours à des fonctions de production ne laisse à l'utilisateur que le choix des élasticités. Par conséquence, les représentations exposées dans ce chapitre, qui traduisent l'état d'avancement présent du modèle, incarnent un choix de représentation parmi d'autres, qu'il est possible de modifier à loisir en fonction des objectifs de chaque travail de modélisation, des raffinements ultérieurs du modèle, ou au fur et à mesure de l'acquisition de nouvelles informations sectorielles.

L'abandon de la fonction de production classique et de l'omniprésence du paradigme de l'optimalité laisse toute latitude pour représenter des évolutions qui ne se résument pas à la seule influence des signaux prix sur les décisions d'affectation des ressources. Le revers de la médaille de cette ouverture est qu'il devient nécessaire de reconstituer l'ensemble des évolutions des coefficients techniques secteur par secteur. Ce besoin d'exhaustivité explique la densité de ce chapitre, qu'il convient de parcourir plus comme un menu que comme un texte linéaire. Le fil de la description est celui de la chaîne énergétique, depuis la production de ressources fossiles jusqu'aux usages finaux.

1 Production d'énergie primaire : disponibilité, production et mise sur le marché des ressources pétrolières[68]

La déplétion des ressources pétrolières et la menace que représente la finitude des ressources 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 se doit 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 du prochain demi-siècle, 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, la maximisation du profit du producteur répartit l'exploitation des ressources sur

[68] Cette partie du modèle a été développée principalement par Henri Waisman dans le cadre du développement collectif de l'outil.

l'ensemble des périodes considérées, en égalisant le bénéfice marginal d'exploitation actualisé tout au long de la trajectoire. Cela fait apparaître une rente pure de rareté qui ne doit pas être confondue avec la rente *ricardienne* (ou rente *différentielle*), générée par la présence sur un même marché de pétroles ayant des coûts de production différents mais vendus au même prix.. 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[69]. 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 (2002) a 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 jusqu'à 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 est limitée physiquement ou/et 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 se cumule avec 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 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 (1956, 1962), représentation alternative du marché du pétrole. Ce modèle prescrit, selon une approche phénoménologique, que la production de pétrole suit une courbe en cloche symétrique à l'échelle régionale. L'observation des productions passées permet de calibrer la hauteur et l'étalement de

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

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[70]. 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 du champ d'exploitation conduit à la production d'un tel profil (Bentley, 2002), (ii) d'autre part sur le lien logique et temporel entre le profil temporel 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 dans le comportement des producteurs. Or les prix courants et anticipés conditionnent la quantité de réserves économiquement exploitables et les incitations à investir dans l'exploration et la prospection, qui impacteront ensuite le rythme des découvertes. Récemment, le rapport World Energy Oulook (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. Ce chiffre suffit à montrer 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 rationalité économique et 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 ressources pétrolières à partir du modèle LOPEX. Les paragraphes suivant détaillent la représentation du lien entre signaux économiques, profils temporels d'exploration et de production contraints physiquement, stratégies de marché et à nouveau 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 une représentation des mécanismes de découverte et de mise en production qui permettent de reconstituer 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, ce qui génère 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 sur :

(i) **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

[70] 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.

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 ainsi d'autant plus forte que de nombreuses découvertes y ont déjà été faites.

(ii) **Les techniques de prospection**, dont les progrès permettent 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.

$$I(t) \propto D(t) \tag{4.1}$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} \propto I(t) \tag{4.2}$$

L'effet de déplétion provient du caractère fini de la ressource pétrolière. 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. En notant Q_∞ le volume de production total cumulé depuis le début de la période préindustrielle, nous pouvons écrire :

$$\frac{\partial D}{\partial t} \propto \left[Q_\infty - D(t)\right] \tag{4.3}$$

Par combinaison des équations (4.1), (3.1) et (4.3), on obtient que les découvertes cumulées suivent une équation différentielle de croissance logistique:

$$\frac{dD(t)}{dt} = K.D(t).\left(Q_\infty - D(t)\right) \tag{4.4}$$

où *K* est une constante. La solution à une telle équation est donnée par :

$$D(t) = Q_\infty.\frac{1}{1+e^{-b(t-t_0)}} \tag{4.5}$$

En différentiant cette expression, on obtient le taux de découverte :

$$\frac{dD(t)}{dt} = Q_\infty.b.\frac{e^{-b(t-t_0)}}{\left[1+e^{-b(t-t_0)}\right]^2} \tag{4.6}$$

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 (4.1), (3.1) et (4.3) 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 Laherrère (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 confirment 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 15).

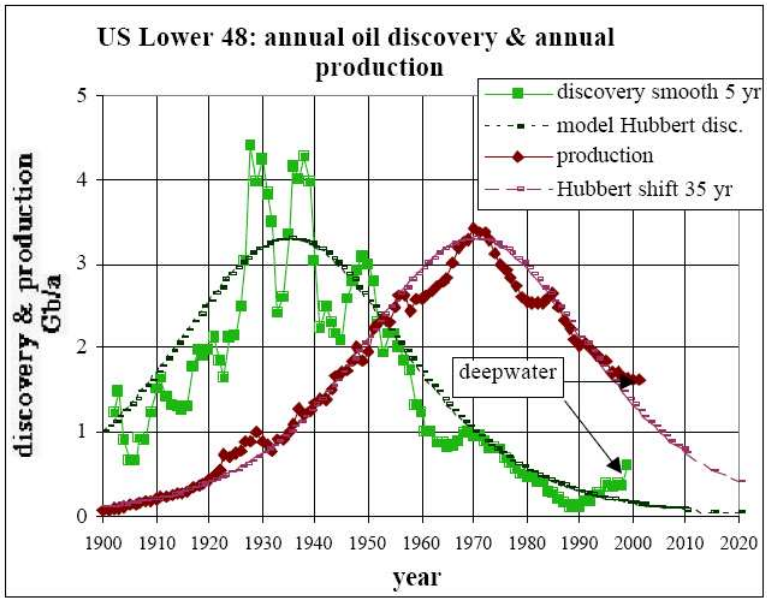


Figure 15 : Découvertes de pétrole décalées de 35 ans et production aux Etats Unis (hors Alaska) (source : Laherrère, 2003)

En traduisant cette constatation empirique comme une routine de comportement des producteurs, nous pouvons réécrire l'équation (4.6) pour la production de pétrole, avec un changement de variable sur le temps :

$$Q(t) = Q_{\infty}.b.\frac{e^{-b(t-t_0)}}{\left[1+e^{-b(t-t_0)}\right]^2} \qquad (4.7)$$

Dans ce modèle de production, la date à laquelle se situe le « pic » de la production est donc 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 ses quantités de découvertes (Figure 16).

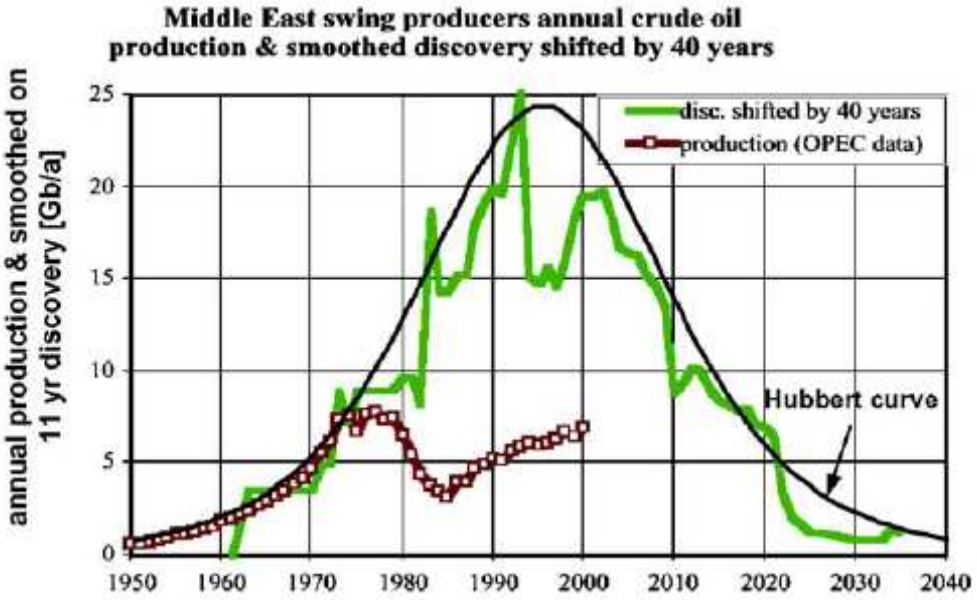


Figure 16 : Profil des découvertes de pétrole et de la production pour le Moyen Orient et courbe de Hubbert calibrée sur les découvertes (Source : Rehrl et Friedrich (2006))

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 anticipé du pétrole est suffisant pour que l'investissement dans de nouvelles réserves soit jugé 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 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 séparées en plusieurs catégories elles-mêmes homogènes en terme 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 à 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 son coût d'exploitation au 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 notre modèle, 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, un point crucial dans l'évaluation des politiques énergétiques ou climatiques. Le choix d'introduire 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. 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 13.

	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 13 : 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[71], ayant recensé 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 ressources conventionnelles et non conventionnelles (Figure 17).

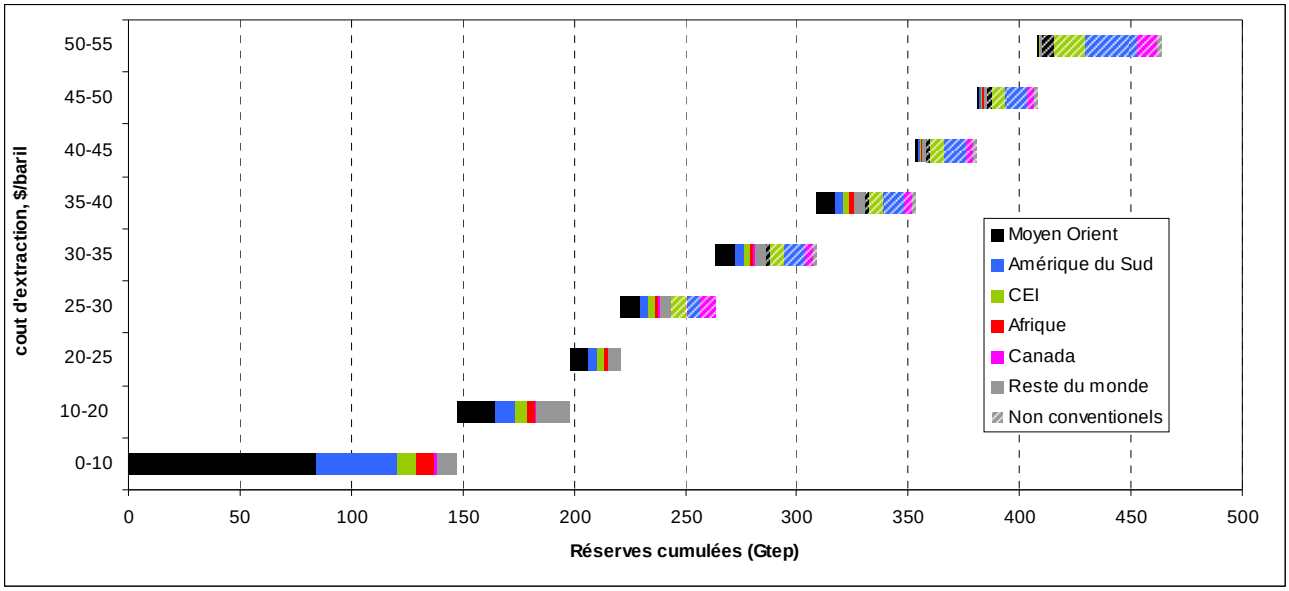


Figure 17 : Classification des réserves de pétrole par région et catégorie de coût d'extraction.

[71] Sustainability and the Use of Non-rEnewable Resources, Projet de recherché européen, finance 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 (4.8).

$$Cap_{k,j}^{pétrole}(t) = Cap_0^{k,j} \cdot b_{k,j} \cdot \frac{e^{-b_{k,j}(t-t_0^{k,j})}}{\left[1+e^{-b_{k,j}(t-t_0^{k,j})}\right]^2} \tag{4.8}$$

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 par contre 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, une valeur de *b* plus faible supposant 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 du niveau des réserves, 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 (4.8) 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 de pétrole exploitable restant (Figure 18).

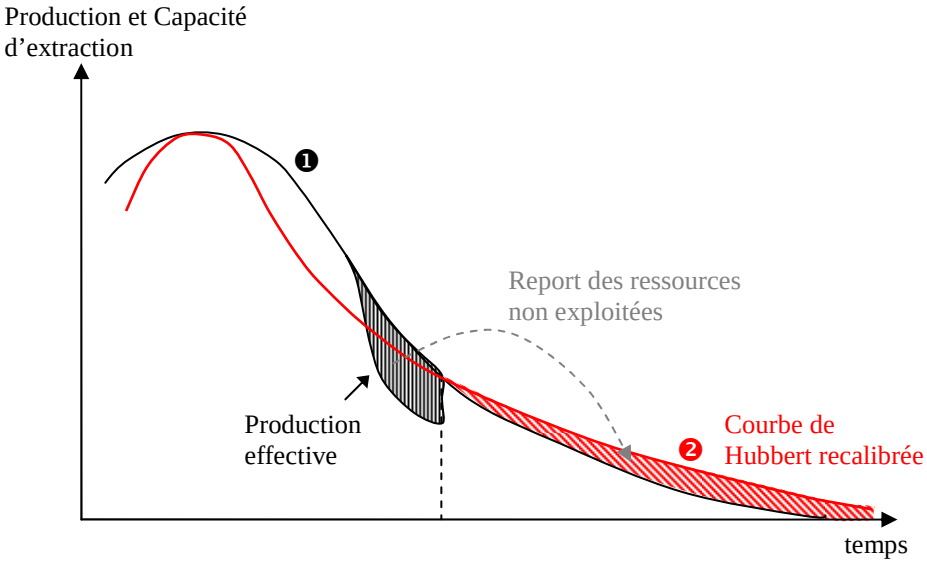


Figure 18 : Recalibrage de la courbe de Hubbert des capacités en cas de sous-exploitation

1.2.3 Comportements 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 contrainte, pour chaque catégorie de pétrole, de la limite imposée par la disponibilité temporelle de cette réserve. 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 partent du postulat qu'ils ne peuvent influencer l'évolution du prix mondial du pétrole et s'adaptent simplement 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[72]. 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 19 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

[72] Si le prix mondial baisse, la catégorie considérée perd sa rentabilité, 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 18 pour conserver la cohérence de la quantité totale de ressources.

du pétrole. Le graphe de 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.

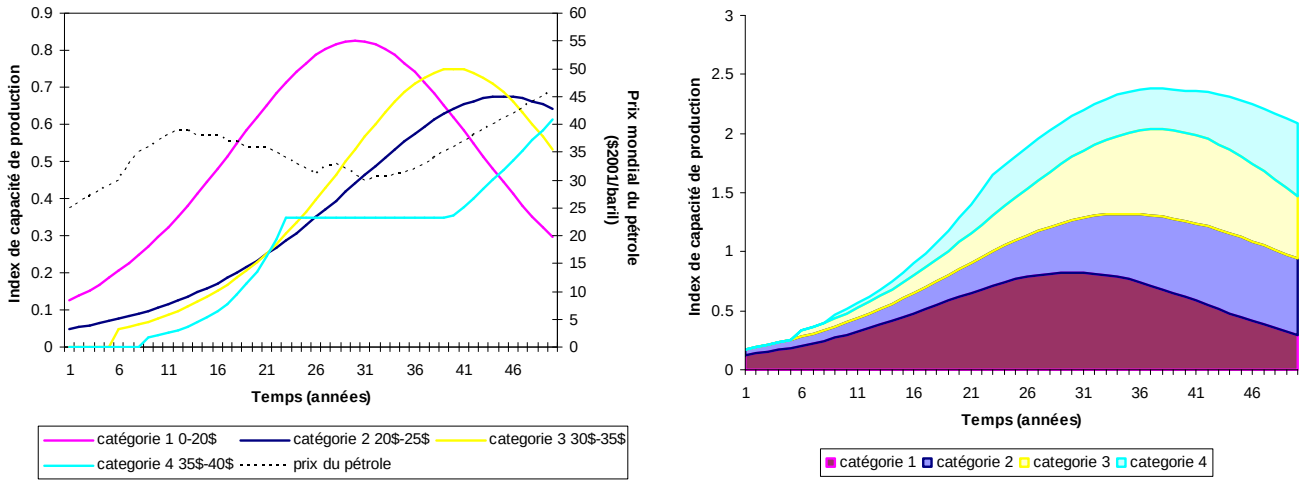


Figure 19 : Exemple d'évolution des capacités de production d'une région

- Le producteur représentatif de la région Moyen-Orient est supposée jouer le rôle de **« swing producer »** : son pouvoir de marché lui permet d'influencer le prix mondial du pétrole via son 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. Par exemple, nous supposons dans les simulations qui suivent que l'OPEP cherche à contrôler 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 (4.9), 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 :

$$\mathrm{p}_{\mathrm{k,oil}} = \sum_j \mathrm{pIC}_{\mathrm{j,oil,k}} \cdot IC_{j,oil,k} + \left(\Omega_{\mathrm{k,oil}} \left(\frac{\mathrm{Q}_{\mathrm{k,oil}}}{Cap_{k,oil}} \right) \cdot \mathrm{w}_{\mathrm{k,oil}} \right) \cdot l_{k,oil} \cdot (1 + tax^{w}_{k,oil}) + \pi_{k,oil} \left(\frac{\mathrm{Q}_{\mathrm{k,oil}}}{Cap_{k,oil}} \right) \cdot \mathrm{p}_{\mathrm{k,oil}} \qquad (4.9)$$

où $\pi_{k,oil}\left(\frac{Q_{k,oil}}{Cap_{k,oil}}\right)$ 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 aussi 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 total et de la production des autres producteurs.

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, 2006). Les résultats de ce modèle prennent en compte la disponibilité des réserves et les 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 US$ par baril ; au-delà les prix du gaz restent seulement gouvernés par l'évolution des coûts de production puis par le phénomène de déplétion qui conduit à une forte hausse du prix via 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 appliqué 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 est peu susceptible d'induire une baisse tendancielle de la production à l'horizon du 21ème siècle, même si 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 fonctions, en fonction des volumes de production cumulée.

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 en cas de politique climatique ou 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 partie 5.3.

Nous décrivons ici le fonctionnement du module dynamique qui gouverne la pénétration des carburants alternatifs sur le marché des carburants liquides. Nous considèrerons 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. A l'année de référence, l'ensemble de la production provient du raffinage du pétrole brut, mais 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 (4.10), (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*).

$$\begin{aligned} Cost_struct_{k,Et} = {} & Cost_struct_{k,Oil_refined}.share_liqufuel_{k,Oil_refined} + \ldots \\ & Cost_struct_{k,Ethanol}.share_liqufuel_{k,Ethanol} + \ldots \\ & Cost_struct_{k,Biodiesel}.share_liqufuel_{k,Biodiesel} + \ldots \\ & Cost_struct_{k,CTL}.share_liqufuel_{k,CTL} \end{aligned} \tag{4.10}$$

Les coefficients techniques de la structure de production du secteur *Energie transformée* ($Cost_struct_{k,Et}$), à savoir les consommations intermédiaires unitaires $IC_{i,Et,k}$, le besoin unitaire de travail $l_{k,Et}$, le taux de marge unitaire $\pi_{k,Et}$ 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

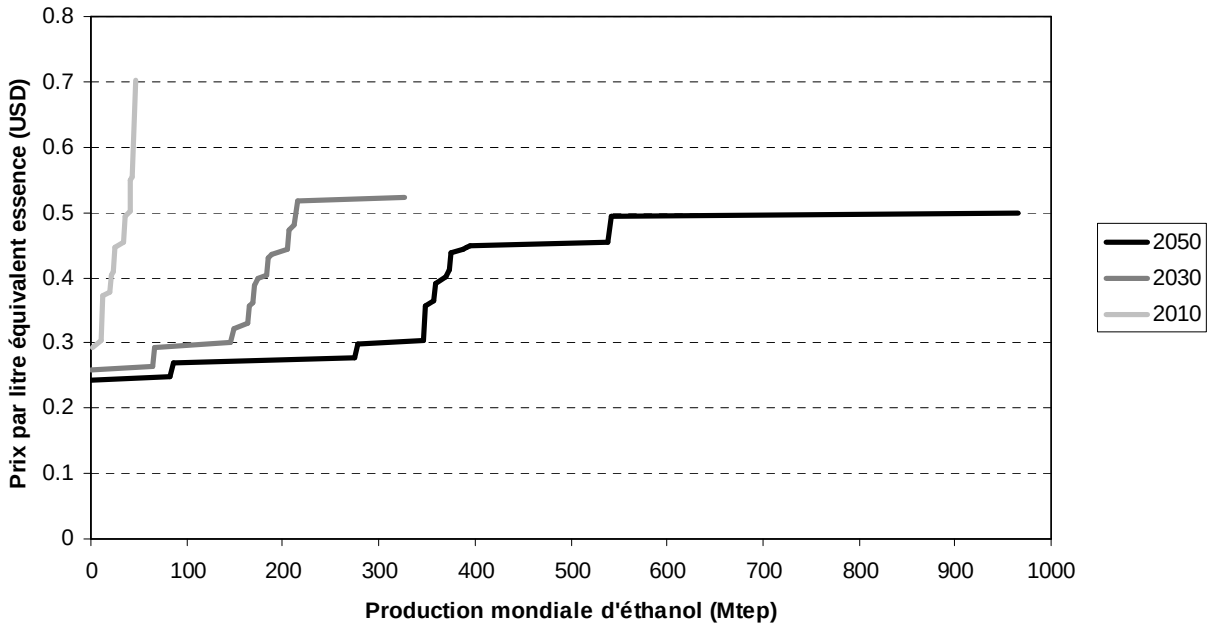
carburants dans le panier régional des produits raffinés dépendent de leurs coûts relatifs et des contraintes qui s'appliquent à leur production. La part de marché de la filière classique de raffinage du pétrole brut résulte directement de l'évolution des capacités de production pétrolière.

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 20). 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 20, les potentiels de production augmentent au cours du temps, avec des baisses de coûts liés au progrès technique continu. Ces augmentations 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 sont susceptibles de modifier considérablement 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, en particulier avec la production d'éthanol à partir de canne à sucre.

Dans le modèle, 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 20, on obtient le potentiel de production d'éthanol et de biodiesel. La ventilation de la production globale dans les régions du modèle est effectuée en fonction les capacités de raffinage existantes.



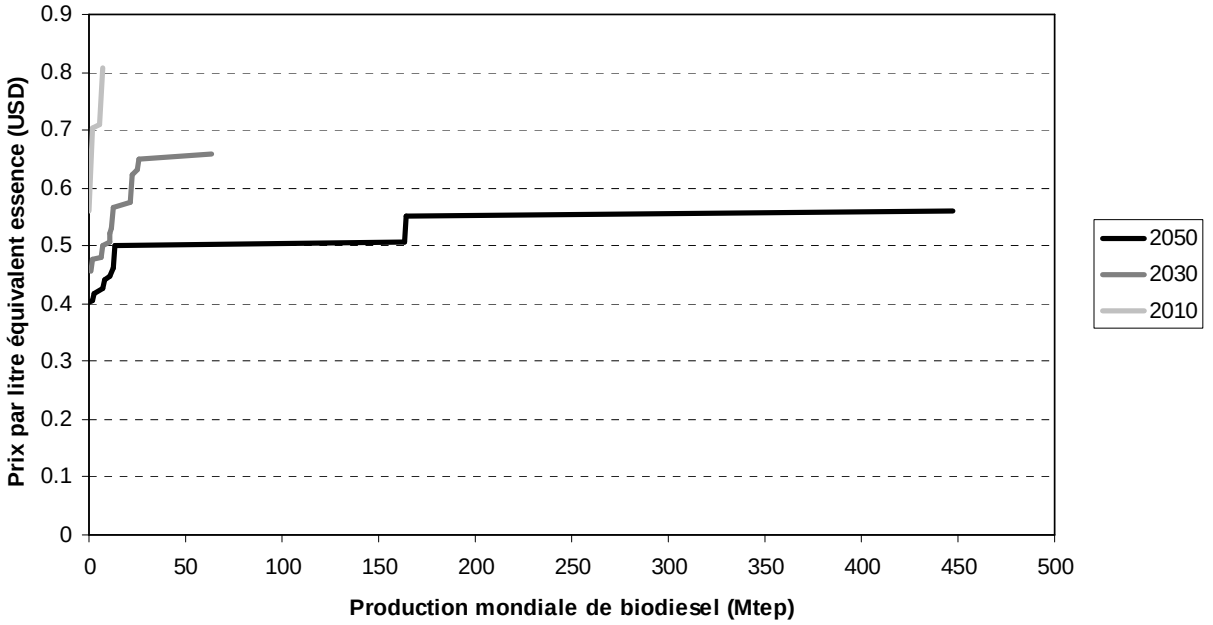


Figure 20 : Evolution des courbes d'offre mondiales pour la production d'éthanol et de biodiesel au cours du temps, source AIE (2006).

3.1.2 Formation du prix et structure de coût

L'évolution de la part des filières biocarburants dans le panier des filières 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 multiplié par le ratio des rendements des carburants.

Dans cette version du modèle, nous supposons que le revenu de la vente des biocarburants est intégralement transmis à la consommation intermédiaire du bien 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 ;
- L'utilisation d'une partie des capacités de production agricole pour les 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 de bien agricole.

3.2 Carburants synthétiques

La production de carburants synthétiques à partir d'hydrocarbures se limite ici à la liquéfaction du charbon ; la liquéfaction du gaz ou encore 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 par tonne équivalent pétrole du charbon et celui des carburants liquides 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 capturées si la technologie est disponible et le prix du carbone élevé.

Le développement de cette filière de production dépend de sa rentabilité face aux carburants liquides issus du raffinage du pétrole : nous supposons que la liquéfaction devient rentable à partir du seuil de prix du pétrole de 100US$ le baril, mais il faut y ajouter l'inertie de l'installation des capacités de transformation.

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 US$ par 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 : Une optimisation sectorielle sous contrainte de courbe de charge[73]

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 gestion des capacités de production et des choix technologiques dans le secteur électrique tient sa particularité 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 l'ensemble des usagers. La production doit donc s'adapter aux larges fluctuations journalières et saisonnières de la demande sur le réseau[74]. Or la rentabilité de chaque technologie de production – dit autrement, le coût complet du coût de production au kWh – dépend du temps d'opération annuel. Celui-ci va dépendre 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 permet de calculer la durée nécessaire de production pour chaque niveau de puissance délivrée sur le réseau, distinguant le besoin de production de base disponible toute l'année du besoin de pointe nécessaire lors des pics de demande, en passant par tous les niveaux intermédiaires.

L'enjeu de l'hybridation top-down / bottom-up est ici particulièrement visible : 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 comme l'acceptabilité sociale, les risques d'investissement, la taille des unités de production, la structure du 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 supplémentaire, à savoir :

- une représentation détaillée des grands types de technologies, qui doivent 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 monotone de puissance (cf. §4.2) 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 ;

[73] Cette partie du modèle a été développée surtout par Olivier Sassi, et avec l'aide de Sandrine Mathy.

[74] 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).

- 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.

4.1 Des technologies de production explicites détaillées en génération de capital

La description des technologies repose ici 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 la capture et séquestration 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 capture et de séquestration du CO_2.

Chacune des 13 technologies représentées est caractérisée par un jeu de paramètres technico-économiques qui permet 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 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 technologique sectoriels (par exemple le modèle POLES, avec lequel nous avons collaboré sur un projet de modélisation hybride sur quatre ans), ou bien sur des informations disparates provenant de la littérature. Le Tableau 14 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 peu matures ou en pleine évolution peuvent évoluer très largement dans le temps, grâce à un processus d'apprentissage, représenté soit comme une évolution autonome, soit comme un mécanisme endogène. Dans ce dernier cas, le coût en capital des technologies décroît et les rendements augmentent avec l'investissement cumulé, selon des courbes d'apprentissage tirées de la littérature. 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. 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.

Paramètre	Notation dans les équation	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	-	-	-
Efficacité de transformation	*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
Prix du combustible (exemple USA 2001)		$ 2001/Tep	237	160	160	160	71	71	71	71	71	-	-	-	-
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 14 : 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.)

Les données du Tableau 14 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*, 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 le 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 employant la technologie *TECH* et installée à l'année i dans chaque région *k*[75]. 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 :

$$Cap_elec_MW_{k,TECH}(t) = \sum_{i=1}^{life_time_{k,TECH}} Cap_MW_{k,TECH}^{vintage}\left((t-1)+i\right) \tag{4.11}$$

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 $t+1$:

$$Cap_MW_depreciated_{k,TECH}(t) = \sum_{i=1}^{life_time_{k,TECH}-1} Cap_MW_{k,TECH}^{vintage}\left(t+i\right) \tag{4.12}$$

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

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 21). 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

[75] 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.

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 22, la monotone se présente sous la forme d'une courbe décroissante, fonction de la durée d'appel mesurée en heures et qui varie donc de zéro à 8760 heures pour 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.

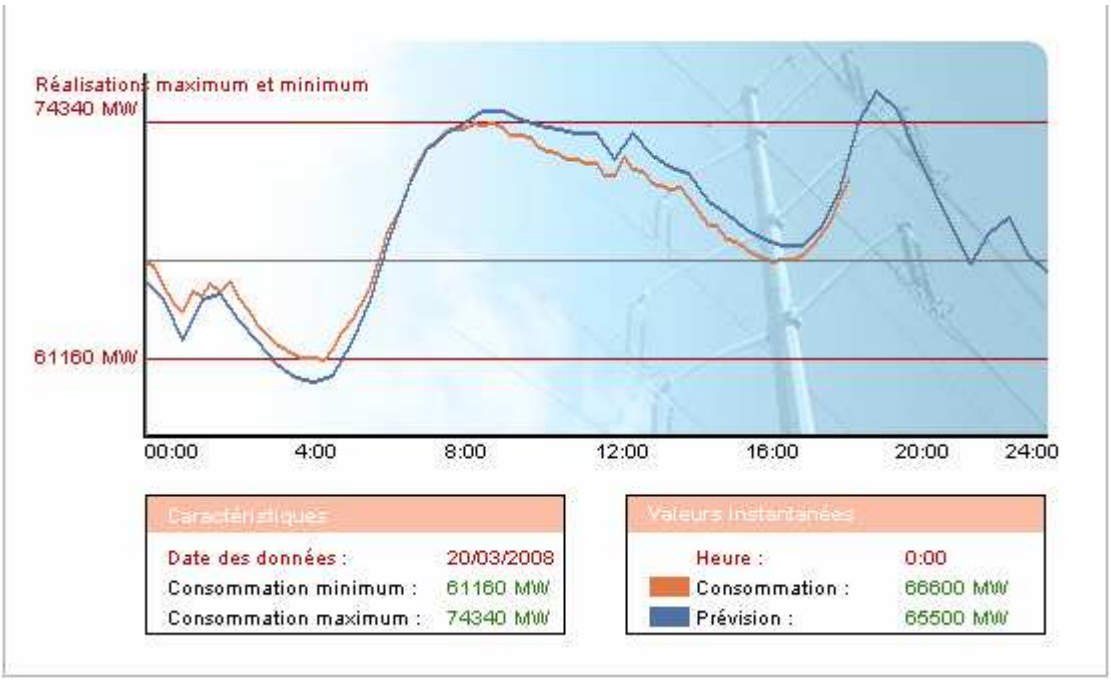


Figure 21 : Courbe de charge du 20 mars 2008.
(Source : site web de RFE)

La forme de la monotone de puissance est propre à chaque région car sa forme est directement liée à 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 22) 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 hauteurs 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.

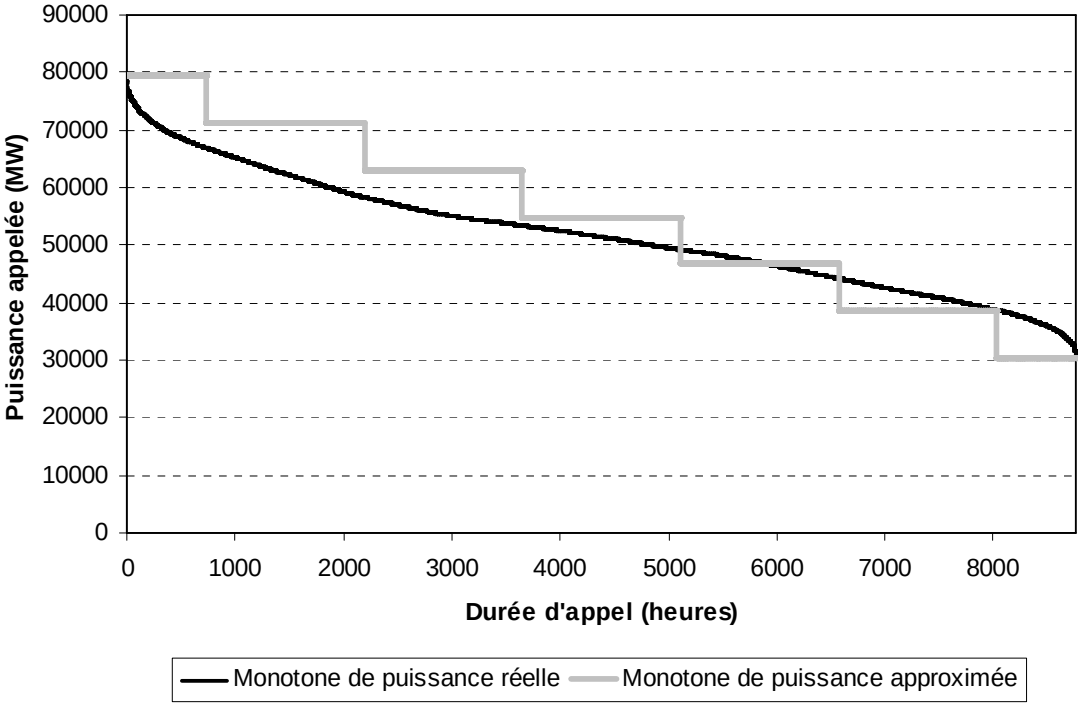


Figure 22 : Exemple de monotones de puissance et méthode d'approximation.

La monotone de puissance est 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 22.

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 technologie. Le passage inverse, de l'énergie aux capacités, est nécessaire lors de la programmation des investissements, puisqu'il faut alors reconstituer, 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[76]. En utilisant notre méthode d'approximation linéaire par morceaux, 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 (4.13) qui rassemble l'équation de constance du ratio et l'équation de contrainte sur la quantité d'énergie produite :

[76] Ce ratio pourrait varier de façon exogène ou endogène, pour intégrer par exemple sa modification suite à des 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.

$$\begin{cases} \dfrac{base_MW_k}{peak_MW_k} = bp_ratio_k \\ \left.\begin{array}{l} base_MW_k \times 8760 \\ + \dfrac{peak_MW_k - base_MW_k}{6} \times \left(8030 + 6570 + 5110 + 3650 + 2190\right) \\ + peak_MW_k \cdot 730 \end{array}\right\} = Q_elec_k \end{cases} \tag{4.13}$$

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 maintenant, avec notre représentation compacte des technologies et de la courbe de charge, des objets techniques nécessaires et suffisants pour modéliser les choix d'investissement dans le secteur électrique à chaque date *t*. Il s'agit en fait de représenter une démarche de planification optimale avec anticipations imparfaites, démarche qui conduit à déterminer le contenu technologique et le volume des investissements à l'année courante 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 :

- Une projection de la demande future et des prix futurs des combustibles ;
- Le choix des capacités de production d'électricité non hydrauliques;
- 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 renouvelables s'explique par les spécificités de ces énergies, notamment leurs potentiels limités. Nous donnons une explication plus détaillée de ces spécificités dans les paragraphes concernés.

4.3.1 Projection de 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. 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) :

$$Q_elec_anticip_k = Q_{k,elec}.(1 + tendance_Q_elec_k)^{10} \tag{4.14}$$

La production anticipée d'électricité du parc conventionnel est associé à une monotone de puissance anticipée qui est déterminée grâce à la résolution du système (4.13). 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 (4.15), seront appelées pour les durées intermédiaires comprises dans l'ensemble discret {8030 , 6570 , 5110 , 3650 , 2190,730} :

$$Cap_MW_anticip_duree_i_k = \frac{peak_MW_anticip_k - base_MW_anticip_k}{6} \quad (4.15)$$

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 prix 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 de futures versions 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. Par contre, 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 public dans les scénarios de réduction des émissions. 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 pris au sérieux 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 la capture et séquestration du CO_2 un coefficient d'atténuation spécifique s'applique à l'assiette de la taxe pour ne compter que les émissions nettes de CO_2.

4.3.2 Décision en amont des capacités de production fondées sur des énergies 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, un surcoût 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[77], qui élimine une partie de la demande 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 :

[77] 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.

- La seule énergie renouvelable non hydraulique 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 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 anticipé par kWh[78] 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 (cf.) 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[79] 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 excéder 40%. La quantité d'énergie éolienne souhaitée à t+10 est alors donnée par l'équation :

$$Q_elec_ENR_anticip_k = Q_elec_anticip_k \cdot share_ENR_elec_k \qquad (4.16)$$

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 éolien offshore, qui 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.

4.3.3 Investissement prioritaire dans l'énergie hydroélectrique

La quantité d'énergie restant à fournir en plus des capacités éoliennes qui ont été déterminées est notée $Q_elec_CONV_anticip_k$. 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 dépendant des sites géographiques disponibles. Nous n'effectuons pas dans ce module de différenciation entre les centrales « fil de l'eau » ou avec retenue. Les capacités de production hydroélectrique sont sollicitées en priorité par rapport à toutes les autres technologies

[78] Se reporter à l'équation (4.23) pour le mode de calcul du coût complet de production
[79] Dans certains cas, une répartition étalée des éoliennes sur le territoire peut garantir une puissance donnée pendant la quasi-totalité de l'année.

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 (Labriet et al., 2004) fournissent le volume potentiel de production hydroélectrique techniquement exploitable (exprimés 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 de production régionale 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).

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 (cf. Figure 23).

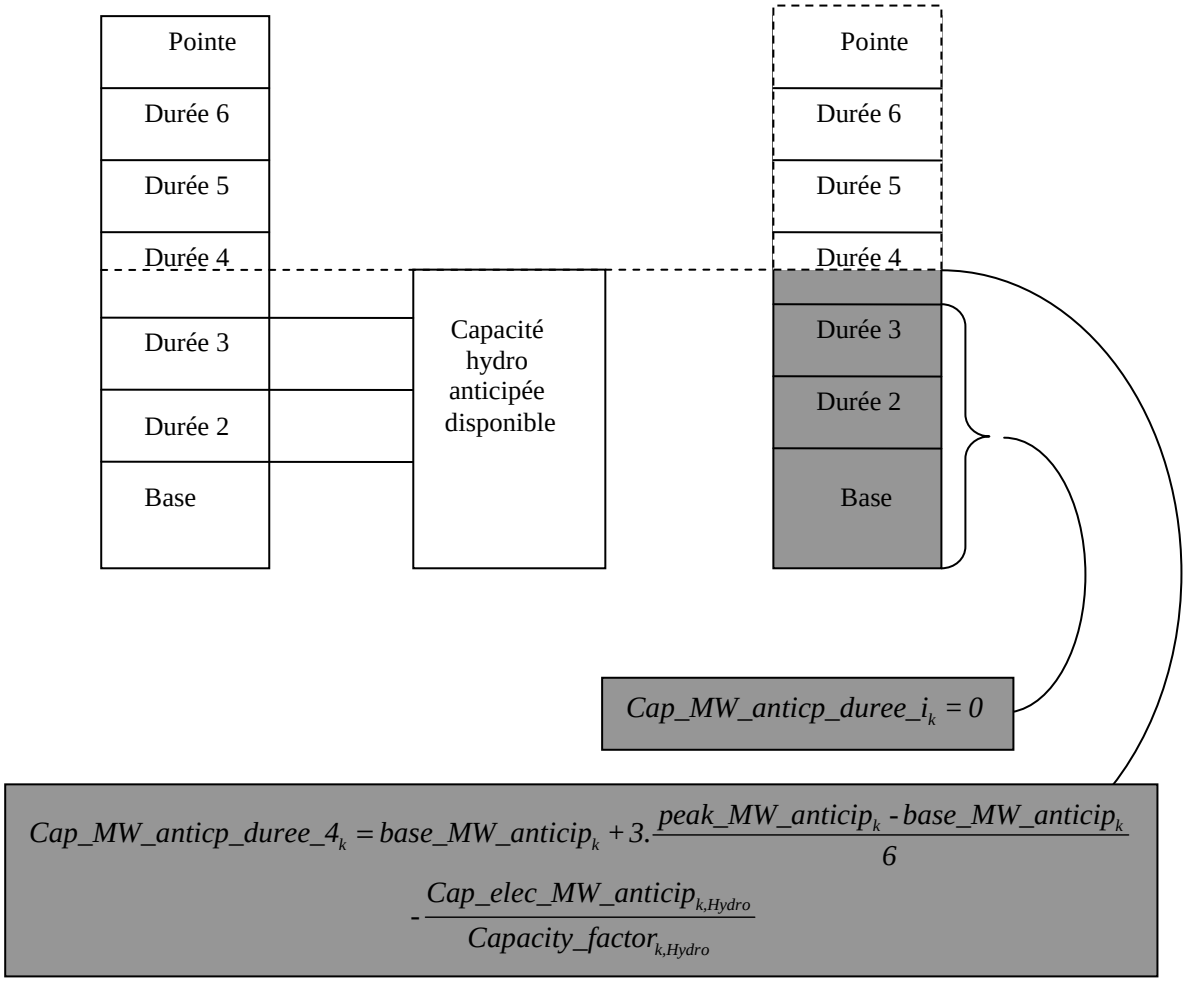


Figure 23 : Exemple de répartition des capacités hydroélectriques anticipées pour répondre aux capacités appelées dans la monotone de puissance.

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, le volume des capacités de production conventionnelles qui devront être disponibles 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 (4.17) ;
- les **coûts totaux actualisés d'exploitation et de maintenance fixes** par kW installé (4.18) ;
- les **coûts totaux actualisés d'exploitation et de maintenance variables** par kWh produit (4.19) ;
- les **coûts totaux actualisés de combustibles**, calculées en utilisant des scénarios de prix finaux des énergies fossiles anticipés (cf. §4.3.1) (4.20).

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 (4.22) (4.23).

$$TC_INV_elec_duree_i_{k,TECH} = CINV_kW_{k,TECH} \tag{4.17}$$

$$TC_OM_fixed_elec_durée_i_{k,TECH} = \sum_{i=1}^{life_time_{k,TECH}} \left(\frac{OM_cost_fixed_{k,TECH}}{\left(1 + disc_{k,TECH}\right)^{i}} \right) \tag{4.18}$$

$$TC_OM_var_elec_durée_i_{k,TECH} = \sum_{i=1}^{life_time_{k,TECH}} \left(\frac{\left(Capacity_factor_{k,TECH} \cdot durée_i\right)}{\left(1 + disc_{k,TECH}\right)^{i}} \cdot OM_cost_var_{k,TECH} \right) \tag{4.19}$$

$$TC_fuel_elec_durée_i_{k,TECH} = \sum_{i=1}^{life_time_{k,TECH}} \left(\frac{Capacity_factor_{k,TECH} \cdot durée_i}{rho_elec_{k,TECH} \cdot \left(1 + disc_{k,TECH}\right)^{i}} \cdot p_fuel_anticip_taxed_{k}(t+i) \right) \tag{4.20}$$

$$TC_elec_durée_i_{k,TECH} = TC_INV_elec_duree_i_{k,TECH} + TC_OM_fixed_elec_duree_i_{k,TECH} + TC_OM_var_elec_duree_i_{k,TECH} + TC_fuel_elec_duree_i_{k,TECH} \quad (4.21)$$

$$LC_elec_durée_i_{k,TECH} = \begin{cases} \dfrac{CRF_{k,TECH}}{Capacity_factor_{k,TECH} \cdot durée_i} \cdot \left(TC_INV_elec_duree_i_{k,TECH} + TC_OM_fixed_elec_duree_i_{k,TECH}\right) \\ + \dfrac{CRF_{k,TECH}}{Capacity_factor_{k,TECH} \cdot durée_i} \cdot \left(TC_OM_var_elec_duree_i_{k,TECH} + TC_fuel_elec_duree_i_{k,TECH}\right) \end{cases} \quad (4.22)$$

Ce qui donne finalement après substitution et simplification :

$$LC_elec_durée_i_{k,TECH} = \frac{CRF_{k,TECH}.CINV_kW_{k,TECH} + OM_fixed_elec_{k,TECH}}{Capacity_factor_{k,TECH}.durée_i} + CRF_{k,TECH} \cdot \sum_{i=1}^{life_time_{k,TECH}} \left(\frac{p_fuel_anticip_taxed_k(t+i)}{rho_elec_{k,TECH} \cdot \left(1 + disc_{k,TECH}\right)^i} \right) + OM_cost_var_{k,TECH} \quad (4.23)$$

$$CRF_{k,TECH} = \frac{disc_{k,TECH} \times (1 + disc_{k,TECH})^{life_time_{k,TECH}}}{\left((1 + disc_{k,TECH})^{life_time_{k,TECH}} - 1\right)} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{life_time_{k,TECH}} \frac{1}{(1 + disc_{k,TECH})^i}} \quad (4.24)$$

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 du 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 1 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 naturel 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 et les incertitudes liées au calcul 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).

En pratique, 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* (4.25). Pour chaque durée d'utilisation, cette fonction de part est calibrée à l'année de référence pour reproduire les comportements réels d'investissement en fonction des coûts de production anticipés calculés dans le modèle. Ces coûts anticipés incorporent un coût supplémentaire appelé *coût intangible* et noté *ICost_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'investissements du secteur électrique dans les régions du modèle à cette date.

$$share_{k,TECH}^{durée_i}(t) = \frac{\left(ICost_elec_durée_i_{k,TECH}(t) + LC_elec_durée_i_{k,TECH}(t)\right)^{-\gamma_elec_k}}{\sum_{TECH_j}\left(ICost_elec_durée_i_{k,TECH_j}(t) + LC_elec_durée_i_{k,TECH_j}(t)\right)^{-\gamma_elec_k}} \tag{4.25}$$

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 :

$$Cap_MW_exp_{k,TECH} = \sum_{durée_i} \frac{share_{TECH,k}^{durée_i}.Cap_MW_anticip_duree_i_k}{Capacity_factor_{k,TECH}} \tag{4.26}$$

4.4 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 donné par

l'équation (4.27). 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.

$$delta_Cap_MW_G_{k,TECH} = \frac{Cap_MW_exp_{k,TECH} - Cap_MW_depreciated_{k,TECH}}{10} \tag{4.27}$$

Dans la version actuelle du modèle, ni la possibilité d'un retrait anticipé de certaines catégories 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 (4.27) sous la double contrainte de :

- ne pas disposer d'investissements négatifs pour certaines technologies ;
- ne pas déboucher sur des nouveaux investissements (en mégawatt) dont la somme conduise, à la période suivante, à un parc de production électrique 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 $Inv_elec_val_k$:

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

$$s.c. \begin{cases} Inv_elec_val_k = \sum_{TECH} Inv_MW_{k,TECH}.CINV_MW_{k,TECH} \\ Inv_MW_{k,TECH} \geq 0 \end{cases} \tag{4.28}$$

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

$$Cap_MW_{k,TECH}^{vintage}(t + lifetime_{k,TECH}) = Inv_MW_{TECH,k} \tag{4.29}$$

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.

4.5 Du parc de production installé au coût moyen de production

Une fois les investissements réalisés, 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. Mais en pratique 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 faisons 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 (§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 selon le même processus que précédemment (§4.2) mais à t+1 au lieu de t+10. Puis le secteur électrique cherche à minimiser les coûts variables de production pour répondre à la demande (hors éolien), 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 (*merit order*) 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 24 fournit un exemple d'empilement des technologies par ordre de mérite en fonction de leur durée d'utilisation.

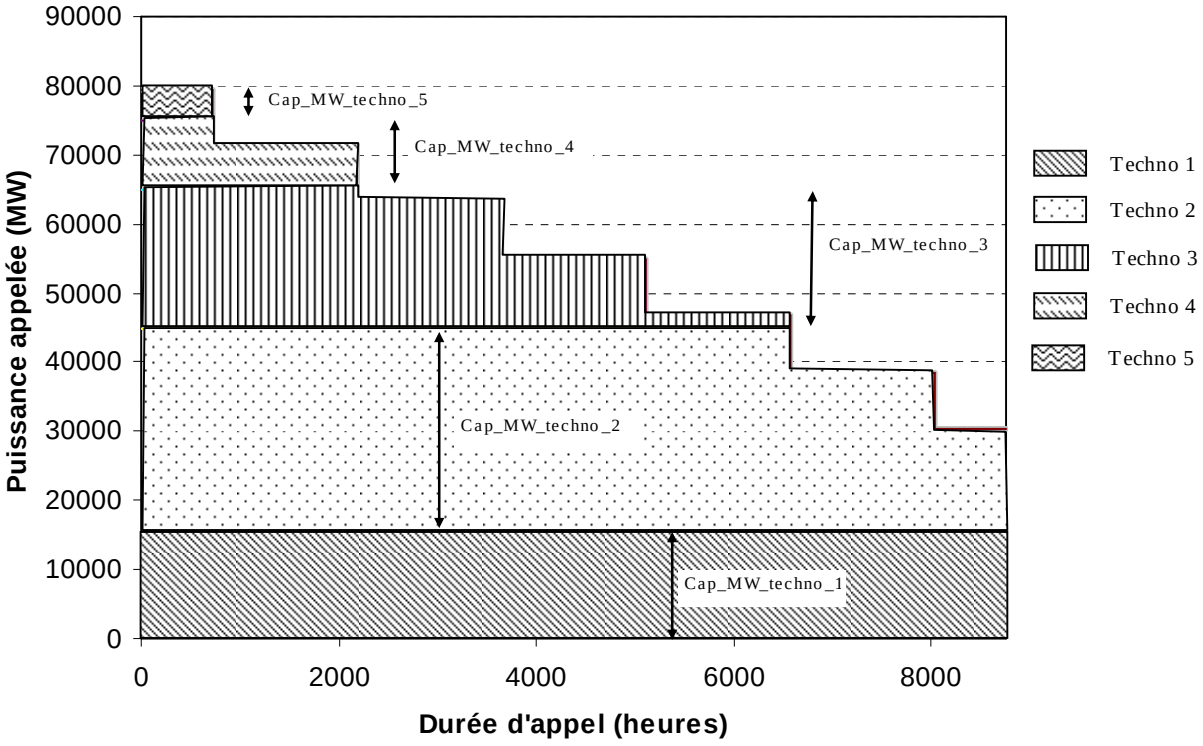


Figure 24 : Exemple de calcul des durées d'utilisation annuelles pour cinq technologies différentes classées par coût de production variable croissant

NB : (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*, avec *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* et 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 se calcule directement à partir de l'efficacité énergétique moyennée sur les générations de capital installées de cette technologie :

$$input_ENER_elec_{k,TECH} = \frac{prod_elec_techno_{k,TECH}}{rho_elec_{k,TECH}} \tag{4.30}$$

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 (4.31), (4.32) et (4.33).

$$IC_{coal,elec,k} = \frac{\sum_{TECH_COAL} \frac{prod_elec_techno_{k,TECH_COAL}}{rhoelec_{k,TECH_COAL}}}{Q_elec_anticip_t+1_k} \tag{4.31}$$

$$IC_{gas,elec,k} = \frac{\sum_{TECH_GAS} \frac{prod_elec_techno_{k,TECH_GAS}}{rhoelec_{k,TECH_GAS}}}{Q_elec_anticip_t+1_k} \tag{4.32}$$

$$IC_{Et,elec,k} = \frac{\sum_{TECH_ET} \frac{prod_elec_techno_{k,TECH_ET}}{rhoelec_{k,TECH_ET}}}{Q_elec_anticip_t+1_k} \tag{4.33}$$

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, composite), 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, 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 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 de portfolio parmi un ensemble 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, §3.1.3).

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 des croissances relatives des sous-secteurs les uns par rapport aux autres. 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 Figure 25:

- 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 ;
- Pour toutes les nouvelles tranches de capacité de tous les secteurs, le **choix des nouvelles techniques**, qui contiennent 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 des progrès au fil de l'eau (❷) et du progrès technique induit par la hausse de la taxe carbone.

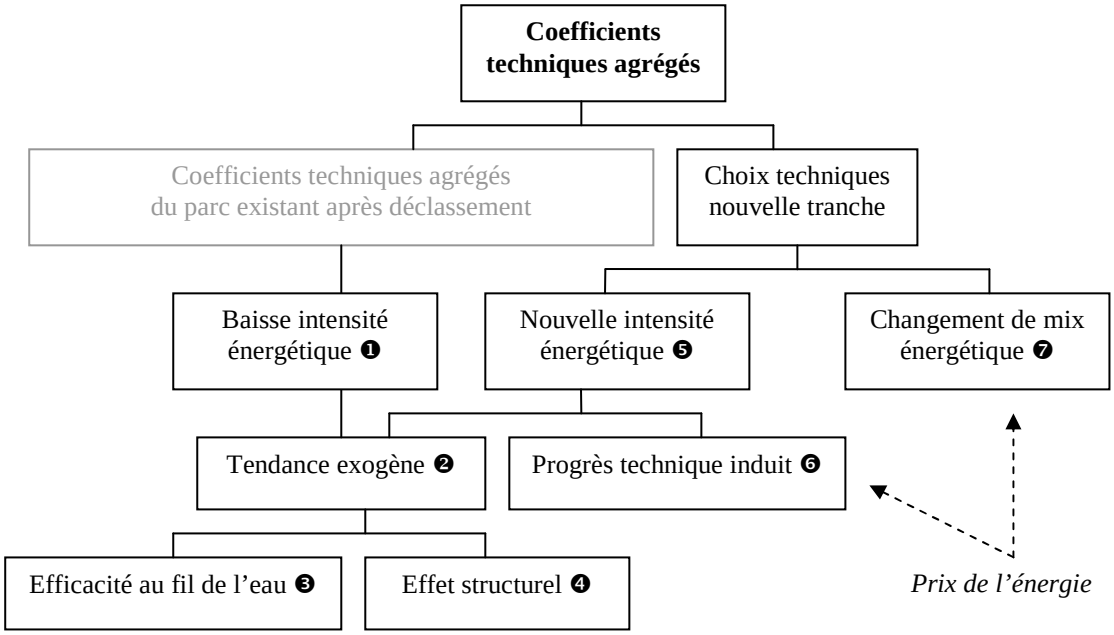


Figure 25 : Schéma de décomposition des changements de consommations intermédiaires d'énergie

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 de gains d'efficacité énergétique dans les secteurs concernés. A titre d'exemple, la Figure 26 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 adressée aux secteurs productifs – ménages, administrations et investissements – et leurs gains de productivité respectifs. A cause du niveau d'agrégation élevé du modèle, cet effet de structure est encapsulé dans un indicateur agrégé de diminution tendancielle de l'intensité énergétique *EEI_struct(t).*

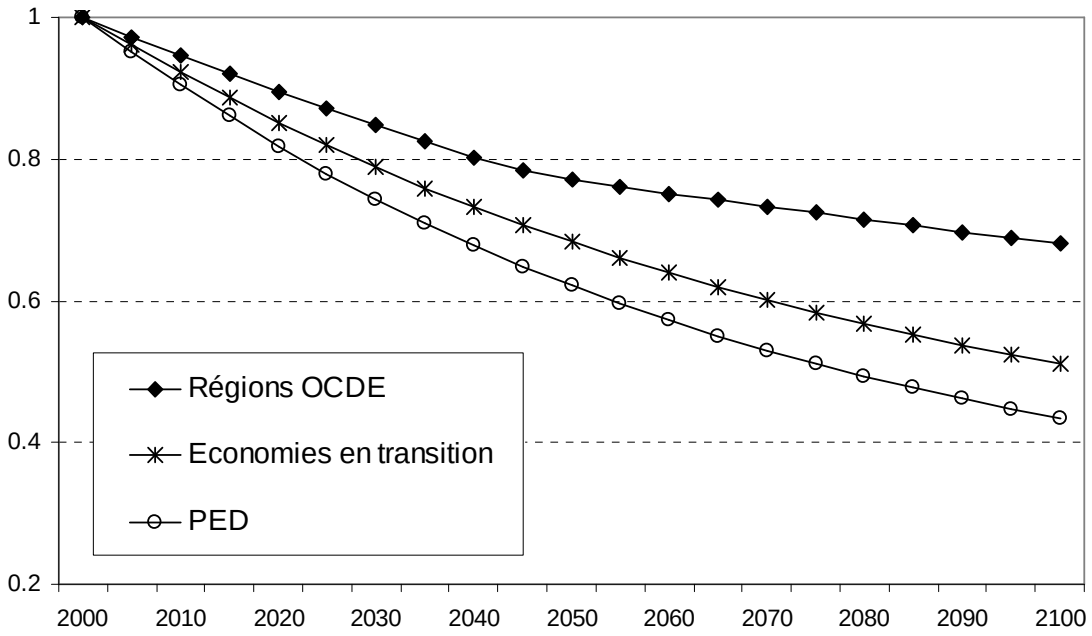


Figure 26 : Réduction de l'intensité énergétique sectorielle modélisée par l'AAEE

Les nouveaux choix technologiques encapsulés 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 27 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.

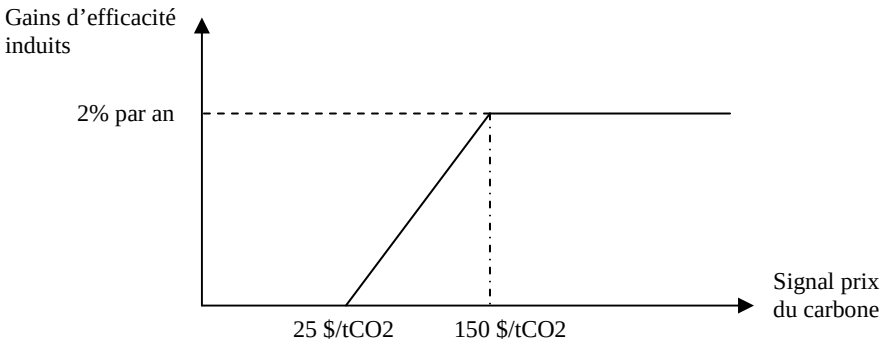


Figure 27 : Gains d'efficacité induits par la taxe carbone

Nous supposons qu'un mécanisme d'apprentissage permet de descendre la valeur du signal-prix du carbone pour laquelle les gains d'efficacité atteignent 2% par an de 150 à 75$ par tonne de CO_2, en fonction des investissements cumulés ayant bénéficié des gains d'efficacité énergétique

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 des agents parmi des technologies identifiées pour produire un service énergétique donné. La part de chaque énergie dans la fourniture de l'énergie utile nécessaire au fonctionnement des nouvelles capacités de chaque « méta-secteur » est donnée par l'équation (4.34) ; 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 est calibré à l'année de référence et encapsule les autres coûts (capital, O&M, etc.) et le niveau de substituabilité des sources d'énergie.

$$share_{ENER,i,k}(t) = \frac{\left(K_sect_{ENER,i,k} + pIC_{ENER,i,k}\right)^{-\gamma_sect_{k,i}}}{\sum_{ENER_j}\left(K_sect_{ENER_j,i,k} + pIC_{ENER_j,i,k}\right)^{-\gamma_sect_{k,i}}} \tag{4.34}$$

La modification des coefficients techniques des « méta-secteurs » intègrent l'ensemble des effets décrits dans la Figure 25. Les consommations intermédiaires unitaires d'énergie *pour la nouvelle génération de capital* à la période *t* sont donnés par l'équation (4.35) :

$$IC^{vintage}_{ENER,j,k}(t + life_time_{k,j}) = \left(1 + AEEI_k(t) + EEI_k(t) + EEI_struct_k(t)\right) \cdot \frac{share_{ENER,i,k}(t)}{share_{ENER,i,k}(t-1)} \cdot IC^{vintage}_{ENER,i,k}(t-1+life_time_{k,i}) \tag{4.35}$$

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 capacité 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, §2.1.3). Elle pèse inévitablement sur le budget des ménages parce qu'elle est directement liée au stock physique de bâtiment disponible à la période courante et de coefficients unitaires de consommation d'énergie par unité de surface, et non à la maximisation d'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[80].

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. 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. 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 (4.36) 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 :

$$M2_pc_k(t+1) = M2_pc_k(t) \cdot \left(1 + \alpha_k(M2_pc(t)) \cdot \frac{Income_pc_k(t)}{Income_pc_k(t-1)} \right) \tag{4.36}$$

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 $Life_time_{k,housing}$) :

$$S_new_{k,housing}(t) = S_{k,housing}(t+1) - S_{k,housing}(t) \cdot \left(1 - \frac{1}{Life_time_{k,housing}} \right) \tag{4.37}$$

L'intensité énergétique par m² dépend de la composition moyenne du stock d'équipements installé 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.

[80] 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.

Dans le **scénario de référence**, les consommations énergétiques par m^2, $\alpha_{k,ENER}^{m^2}(t+1)$, différenciées par type d'énergie et par région, évoluent selon une trajectoire exogène calibrée 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/m^2, 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 un durcissement progressif de la réglementation. Suivant ce schéma, deux types de logements peuvent coexister au sein du parc : les logements standard *(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 annuel maximal fixé à 2,5%. Au départ, ce niveau est atteint pour un signal prix du carbone de 100$ par tonne de CO_2, mais nous supposons qu'il existe un effet d'apprentissage progressif qui peut faire décroître ce seuil jusqu'à 50$ par tonne de CO_2, en fonction du cumul des surfaces de logement « très basse énergie » déjà construites.

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

$$\begin{aligned} stock_m2_BAU(t+1) = {} & stock_m2_BAU(t)\cdot\left(1-\frac{1}{Life_time_{k,housing}}-rate_renov_TBE(tax_CO_2)\right) \\ & + S_new_{k,housing}(t)\cdot(1-share_TBE_new(tax_CO_2)) \end{aligned} \tag{4.38}$$

$$\begin{aligned} stock_m2_TBE(t+1) = {} & stock_m2_TBE(t)\cdot\left(1-\frac{1}{Life_time_{k,housing}}\right) \\ & + S_new_{k,housing}(t)\cdot share_TBE_new(tax_CO_2) \\ & + stock_m2_TBE(t)\cdot rate_renov_TBE(tax_CO_2) \end{aligned} \tag{4.39}$$

avec :

$$stock_m2_BAU(1) = M2_pc(1) \cdot Ltot(1)$$
$$stock_m2_TBE(1) = 0$$
$$rate_renov_TBE(tax_CO_2) \leq 0.025$$

Les consommations énergétiques moyennes par unité de surface sont ensuite obtenues en faisant la moyenne des caractéristiques énergétiques des parcs de logements BAU et TBE, pondérées de leur part dans le parc total :

$$\alpha_{k,ENER}^{m^2}(t+1) = \frac{\alpha_{k,ENER}^{m^2,BAU}(t+1) \cdot stock_m2_BAU(t+1) + \alpha_{k,ENER}^{m^2,TBE}(t+1) \cdot stock_m2_TBE(t+1)}{stock_m2_BAU(t+1) + stock_m2_TBE(t+1)} \tag{4.40}$$

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 l'évolution de la distribution des revenus au sein de la population, mais peu sensible aux variations de prix des carburants (Storchmann, 2005). Dans IMACLIM-R, la représentation de ce lien 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 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 de richesse absolu 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 ainsi relié à l'évolution du revenu disponible par habitant selon l'équation suivante :

$$CARS_pc_k(t+1) = CARS_pc_k(t) \cdot \left(1 + \alpha_k(CARS_pc_k(t)) \cdot \frac{Income_pc_k(t)}{Income_pc_k(t-1)}\right) \tag{4.41}$$

L'élasticité revenu α_k est reliée au taux de motorisation selon une formule adaptée du modèle *SMP* et schématisée sur la Figure 28. Dans les régions dont le revenu moyen en parité de pouvoir d'achat n'excède pas 5000 US $ 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 important dans la contrainte de budget temps des ménages de l'équilibre statique.

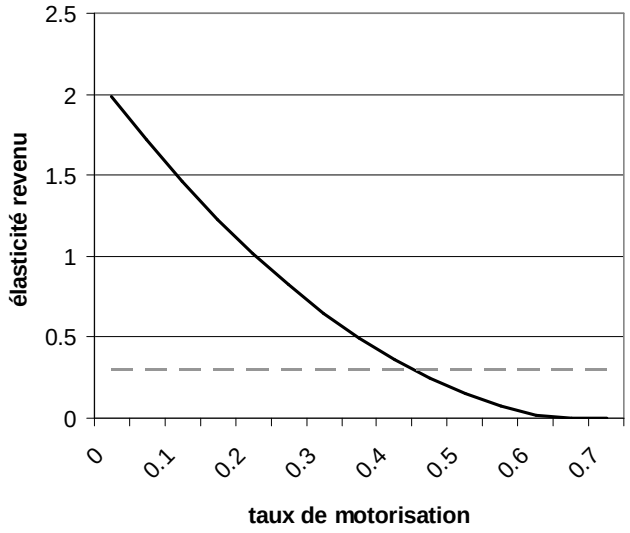


Figure 28 : Evolution de l'élasticité-revenu α_k en fonction du taux de motorisation.

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 conventionnelle, soit hybride, avec 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 litre pour 100 kilomètres. Elle peut être interprétée 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 d'un 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 (§4.3.4). Pour cela les ménages formulent des anticipations myopes sur les futurs prix finaux 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 kilomètre à partir d'un véhicule utilisant une technologie donnée *TECH* s'obtient selon l'équation (4.42) 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 ex. 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 (notée $\alpha_{k,ENER}^{CAR,TECH}$). Dans tous ces calculs, le taux d'actualisation adopté par les ménage, noté $disc_{k,CAR}$, est fixé comme une hypothèse de scénario, entre 0.12 et 0.18, selon les régions.

$$\begin{aligned} LC_{k,TECH} = & \frac{CRF_cars_{k,TECH}.CINV_cars_{k,TECH} + OM_fixed_cars_{k,TECH}}{average_km_per_year_k} \\ & + CRF_cars_{k,TECH}.\sum_{i=1}^{life_time_{k,CAR}} \left(\frac{p_fuel_anticip_taxed_cars_k(t+i)\cdot \alpha_{k,ENER}^{CARS,TECH}}{\left(1+disc_cars_{k,TECH}\right)^i} \right) \\ & + OM_var_cars_{k,TECH} \end{aligned} \tag{4.42}$$

avec:

$$CRF_cars_{k,TECH} = \frac{disc_cars_{k,TECH}}{\left(1-\left(1+disc_cars_{k,TECH}\right)^{-life_time_{k,CAR}}\right)} \tag{4.43}$$

Les parts de marché de chaque technologie sur l'ensemble des nouveaux véhicules produits à la période courante 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) :

$$MS_cars_{k,TECH} = \frac{LC_{k,TECH}^{-\gamma_{k,CARS}}}{\sum_{TECH_j}\left(LC_{k,TECH_j}^{-\gamma_{k,CARS}}\right)} \tag{4.44}$$

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 :

$$\alpha_{k,ENER}^{CARS}(t+1)=\frac{\sum_{TECH}\left(\sum_{j=1}^{life_time_{k,CARS}} CARS_{TECH,k}^{vintage}(t+j)\cdot\frac{\alpha_{k,ENER}^{vintage,CARS}(t+j)\cdot on_road_gap_factor_k}{occupancy_k}\right)}{\sum_{TECH}\left(\sum_{j=1}^{life_time_{k,CARS}} CARS_{TECH,k}^{vintage}(t+j)\right)} \quad (4.45)$$

Cette équation inclut deux paramètres comportementaux tirées 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 transports : 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 trois secteurs transport. L'évolution des niveaux de capacité modifie ensuite l' « efficacité-temps » des transports dans le calcul du budget-temps (Figure 29).

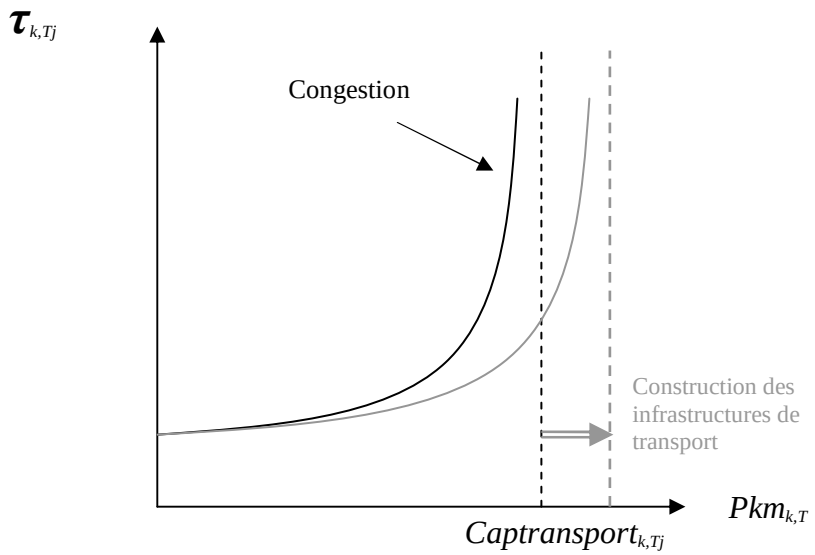


Figure 29 : Effet de l'extension des capacités sur l'efficacité marginale en temps des transports

Les **consommations intermédiaires d'énergie des transports** répondent à des formes réduites simples de gains d'efficacité :

- Dans le secteur aérien, les consommations intermédiaires d'énergie suivent une tendance autonome 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 (4.46). 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' regoupe à la fois du fret et du transport passager, aussi bien sur route (camion, bus) que sur rail. 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 le constituent. 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.

$$IC_new_{Et,Other\ Trans,k} = max\left(IC_{Et,Other\ Trans,k}(1)\cdot\left(\frac{pIC_{Et,Other\ Trans,k}(t)}{pIC_{Et,Other\ Trans,k}(1)}\right)^{elast_Et_OT_k}, IC_{Et,Other\ Trans,k}(1)\cdot Asympt_Et_OT_k \right) \tag{4.46}$$

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 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 le scénario de référence, conformément aux tendances historiquement observées, ces coefficients de consommation intermédiaire sont maintenus constants. Dans les scénarios de réduction des émissions, les hypothèses de réorganisation des activités ou des zones urbaines peuvent nous conduire à supposer un découplage des activités de transport.

6 Conclusion

La description des modules dynamiques technico-économiques met en évidence à la fois la *flexibilité* de la représentation des univers techniques dans chaque secteur du modèle 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 ex. 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 étudier spécifiquement les secteurs clés de la sidérurgie et de la production de ciment (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, permettant une validation progressive par les experts sectoriels et une meilleure assimilation par les décideurs.

Références

AIE, 2004, *World Energy Outlook*, IEA/OCDE, Paris

AIE, 2006, *Energy Technology Perspectives: Scenarios and Strategies to 2050*, IEA/OCDE, Paris

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, 513–44

Bardi, U., 2005, "The mineral economy: a model for the shape of oil production curves", *Energy Policy*, 33**,** 53-61

Bentley, R.W., 2002, "Global oil & gas depletion: an overview", *Energy Policy*, 30(3), 189-205

Clarke, J., F., Edmonds, J. A., 1993, "Modelling energy technologies in a competitive market", *Energy Economics*, 15(2), 123-129
.
Fulton, L., Eads, G., 2004, "IEA/SMP Model Documentation and Reference Case Projection", http://www.wbcsd.org/web/publications/mobility/smp-model-document.pdf

Hubbert, M.K., 1956, "Nuclear energy and the fossil fuels", *Drilling and Production Practice*, American Petroleum Institute, 7-25

Hubbert, M. K., 1962, Energy Resources, A Report to the Committee on Natural Resources, National Academy of Sciences. 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", *International Journal of Global Energy Issues*, 18(2-4), 218-238

Laherrère, J.H., 2003, "Future of oil supplies", *Energy Exploration & Exploitation*, 21(3), 227-267

LEPII, 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)

Rehrl, T., Friedrich, R., 2006, "Modelling long-term oil price and extraction with a Hubbert approach: The LOPEX model", *Energy Policy*, 34(15), 2413-2428

Rogner, H., 1997, "An assessment of world hydrocarbon resources", *Annual Review of Energy and the Environment*, 22, 217-262

Storchmann, K., 2005, "Long-run gasoline demand for passenger cars: the role of income distribution", *Energy Economics*, 27, 25–58

Szklo, A., Machado, G., Schaeffer, R., 2007, "Future oil production in Brazil – estimates based on a Hubbert model", *Energy Policy*, 35, 2360-2367

Chapitre 5

Scénario « Laisser-faire » : les déterminants d'un futur très intensif en carbone

'After 500 years, [global average temperature] is projected to increase by 6.2 °C over the 1900 global climate. While we have only the foggiest idea of what this would imply in terms of ecological, economic, and social outcomes, it would make most thoughtful people – even economists – nervous to induce such a large environmental change. Given the potential for unintended and potentially disastrous consequences, it would be sensible to consider alternative approaches to global warming policies.' (Nordhaus, 1997)

Scénarios de référence utilisés par une écrasante majorité de simulations macro-énergétiques de long terme, les projections du SRES (Nakicenovic et al., 2000) sont aujourd'hui remises en cause. Tout d'abord, l'analyse des tendances récentes semble montrer que l'économie mondiale est lancée sur une trajectoire d'émissions de type A1F, un scénario de croissance rapide reposant sur un large usage des ressources fossiles borne supérieure de l'intervalle d'incertitudes incarné par les scénarios SRES (Raupach et al., 2007). Par ailleurs, les hypothèses technologiques qui sous-tendent les scénarios ont été récemment critiquées par Pielke et al. (2008), qui prétendent que les scénarios SRES, censés ne contenir aucune politique climatique, sont en fait fondés sur des gains d'efficacité énergétique très larges dépassant largement ce que les auteurs estiment comme plausible dans un scénario « laissez-faire ». Quelle que soit la validité de cette critique, elle apparaît symptomatique du contexte de défiance vis-à-vis des scénarios SRES que nous avons souligné au premier chapitre. Partant de là, il nous a semblé intéressant d'utiliser le modèle IMACLIM-R pour tenter d'expliciter quels peuvent être les mécanismes moteurs de la hausse des émissions mondiales dans un scénario *« de référence »* sans politique ambitieuse de stabilisation des concentrations de GES. Il s'agit en quelque sorte de vérifier quelles sont les forces de rappel qui pourraient soutenir à long terme les dynamiques globales inquiétantes observées ces dernières années, en particulier un tassement des progrès d'efficacité énergétique et un re-décollage de l'intensité carbone du panier énergétique. Cette question a un intérêt direct pour l'étude des politiques de réduction des émissions, puisqu'elle conduit, via l'analyse des déterminants robustes de la hausse des émissions, à identifier les leviers susceptibles de permettre un contrôle efficace de ces émissions[81].

Dans cette optique, nous opérons une inversion de posture par rapport aux pratiques courantes des modélisateurs. Depuis la publication du rapport SRES en 2000, la majorité des efforts de modélisation a été consacrée à l'étude des scénarios de réduction des émissions, en calibrant les hypothèses constitutives des modèles de manière à reconstituer un scénario de référence similaire à l'un des scénarios SRES. Il aurait été instructif que les modélisateurs vérifient alors systématiquement la plausibilité des hypothèses ainsi reconstituées – sur la productivité du travail, les gains d'efficacité énergétiques, etc. – mais il semble que ce travail n'est en général pas réalisé, en tous cas jamais explicité[82]. Nous avons ici choisi de reprendre une approche « à l'endroit » qui part des éléments de récit narratif sur la trajectoire projetée, les traduit en hypothèses quantifiées et utilise le modèle comme révélateur de l'interaction, non triviale *a priori*, de ces hypothèses à long terme. Nous n'avons donc pas choisi, en amont, de produire un scénario de référence débouchant sur des émissions en forte croissance. Notre démarche s'est bornée à adopter des hypothèses médianes sur les hypothèses macroéconomiques, énergétiques et de styles de développement et à observer le comportement du modèle et la trajectoire d'émissions qu'il génère à partir d'un forçage a priori raisonnable.

Notre projection de référence induit une multiplication par 2.7 des émissions mondiales de CO_2 d'ici 2050. Cette croissance est alimentée aux trois quarts par les pays aujourd'hui émergents ou en développement, du fait de la combinaison des dynamiques de rattrapage économique dans ces pays et d'un recours persistant aux énergies fossiles, malgré des tensions croissantes sur les ressources pétrolières et gazières. Les dynamiques de rattrapage, qui ne concernent pas seulement la productivité du travail mais aussi les infrastructures, les niveaux d'équipements finaux des ménages et la demande de mobilité, constituent des déterminants très robustes d'une explosion de la demande de services

[81] Evidemment, un modèle ne contient jamais d'autres mécanismes que ceux que le modélisateur a au préalable identifiés puis inclus dans le système de représentation, mais il permet de révéler des effets de système non triviaux et de hiérarchiser les mécanismes déterminants.

[82] En général une référence au rapport et à l'un des scénarios SRES est la seule justification apportée au choix d'un scénario de référence, sans démonstration que les paramètres obtenus pas calibrage « inverse » pour reconstituer ce scénario sont valides.

énergétiques dans ces pays tant pour la production de matériaux qu'au niveau de la demande finale. Les niveaux actuels de services énergétiques par habitant sont bien en deçà des asymptotes de saturation éventuelles, ce qui laisse présager une croissance de la demande particulièrement vigoureuse pour plusieurs décennies. Les tensions croissantes sur les ressources fossiles sont susceptibles d'aggraver la situation des catégories les plus pauvres des pays en développement, mais risquent de n'avoir qu'un effet limité sur les aspirations au progrès de très larges masses d'individus accédant aux classes « moyennes » grâce à un rattrapage économique vigoureux.

1 Hypothèses centrales du scénario de référence

La constitution d'un scénario de long terme s'articule autour de trois sous-ensembles d'hypothèses : (i) les hypothèses macroéconomiques, (ii) les hypothèses énergétiques, (iii) les hypothèses sur les styles de développement. La distinction entre ces trois corps d'hypothèses ne signifie pas qu'elles seront prises indépendamment : premièrement, ces hypothèses découlent simultanément d'un *récit* cohérent constitué en amont du modèle ; deuxièmement, le modèle IMACLIM-R est précisément conçu pour endogénéiser au maximum les interactions entre ces trois ensembles d'hypothèses de façon à prendre en compte les éventuels effets de systèmes et à identifier les combinaisons éventuellement non plausibles.

Le récit qui sous-tend notre scénario de référence est celui d'une **poursuite des tendances actuelles** sans rupture significative d'ici 2050. Par « tendances actuelles », nous entendons plus particulièrement :

- une globalisation toujours croissante de la production et de la consommation de biens et services ;
- une croissance mondiale dynamique, alimentée principalement par une croissance à deux chiffres dans les pays émergents, dont une partie de la population connaît un rattrapage rapide des niveaux de richesse des pays industrialisés ;
- une croissance « molle » des pays industrialisés, alimentée en majorité par le secteur des services, allant de pair avec une saturation progressive des besoins d'équipements des ménages ;
- une évolution rapide des rapports de force économiques, liés à la spécialisation des activités régionales, à l'hétérogénéité des dynamiques démographiques et à des différentiels de croissance allant jusqu'à 10% entre pays développés et pays en développement ;
- une hausse des tensions sur les ressources et sur les matériaux, hausse liée en particulier à la croissance soutenue des besoins des pays émergents ;
- des progrès technologiques continus permettant un accès croissant aux énergies renouvelables, à des équipements plus efficaces, aussi bien dans les pays industrialisés que dans les pays en développement ;
- une expansion rapide des zones urbaines dans tous les pays émergents et les pays en développement, induisant une explosion des besoins de services énergétiques et de transport ;
- globalement, un « mimétisme » important dans les choix de développement et d'organisation spatiale des pays émergents et en développement par rapport aux schémas mis en place dans les pays de l'OCDE : une urbanisation très consommatrice d'espace et laissant une large place au transport automobile individuel, des réseaux d'électricité centralisés, un très fort degré d'ouverture des économies.

1.1 Hypothèses macroéconomiques

1.1.1 Démographie

Les hypothèses démographiques sont celles du scénario médian de la division démographique des Nations Unies[83]. Elles supposent que la population mondiale passe à 7,5 milliards d'habitants en 2020 puis 9 milliards en 2050[84], dont 84% dans les pays actuellement en développement (Figure 30). La population des pays *aujourd'hui* développés est supposée se stabiliser autour de 1.2 milliards d'habitants, les flux migratoires importants (2,3 millions par an, soit 0.2% de la population) et l'allongement de la durée de vie (l'âge médian passerait de 38 ans en 2005 à 46 ans en 2050) compensant une fertilité atone (moins de 1.8 enfant par femme pendant toute la période). Parmi les pays de l'OCDE, seuls les USA conserveraient un certain dynamisme démographique, avec une croissance de 6.2 ‰/an (Tableau 15).

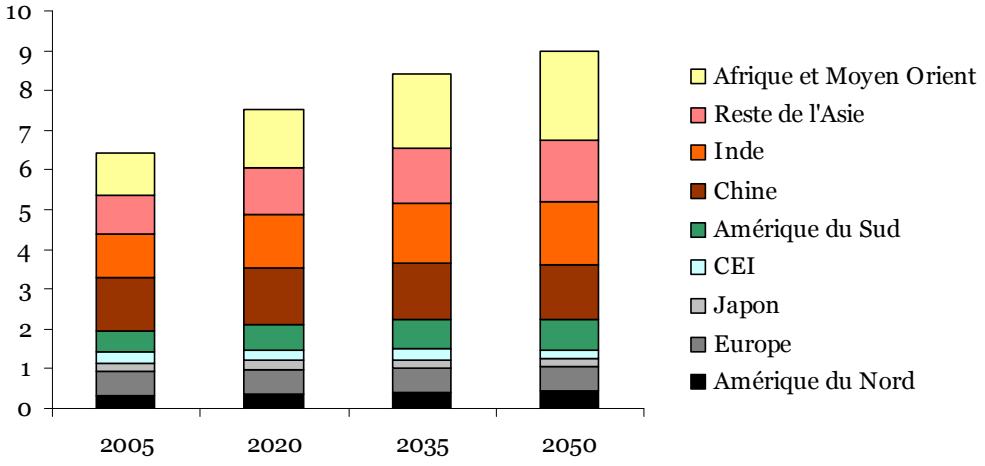


Figure 30 : Population totale (Milliards d'habitants)

Dans les pays à faible croissance, le vieillissement rapide de la population va de pair avec une baisse continue des taux d'activité (ratio de la population active[85] sur la population totale). Les Etats-Unis connaissent aussi un vieillissement important, mais leur croissance démographique dynamique permet de maintenir leur taux d'activité au-dessus de 60%. La Chine devra faire face à un vieillissement très important, contrecoup de sa politique de l'enfant unique et de l'augmentation du niveau de vie. Les pays à forte croissance démographique voient leur taux d'activité, qui sont plus faibles en début de période, augmenter jusqu'en 2030, 2040 ou plus (Figure 31). Progressivement, les pays en développement connaissent leur transition démographique, abaissant leur taux moyen de natalité de 2.9 à 2.0 enfants par femme.

[83] http://esa.un.org/unpp/

[84] L'incertitude sur la population mondiale est très large puisque les projections de l'ONU en 2050 s'échelonnent de 8 à 12 milliards d'habitants, la bifurcation vers le haut ou le bas dépendant principalement des hypothèses de transition démographique dans les PED.

[85] Rappelons qu'ici la population active est en fait la population *en âge de travailler*, décrite à travers la tranche 18-65 ans dans les pays développés et 15-65 ans dans les pays en développement.

Tableau 15 : Taux de croissance moyen de la population totale et active sur la période 2005-2050

	Population totale	Population active
Amérique du Nord	**6.2 ‰**	**4.4 ‰**
Europe	0.3 ‰	-2.9 ‰
Japon	-0.6 ‰	-5.6 ‰
CEI	-3.3 ‰	-4.9 ‰
Amérique du Sud	**7.4 ‰**	**8.0 ‰**
Inde	**8.1 ‰**	**10.6 ‰**
Chine	1.2 ‰	-2.0 ‰
Reste de l'Asie	**10.0 ‰**	**11.8 ‰**
Afrique et Moyen Orient	**16.6 ‰**	**20.9 ‰**

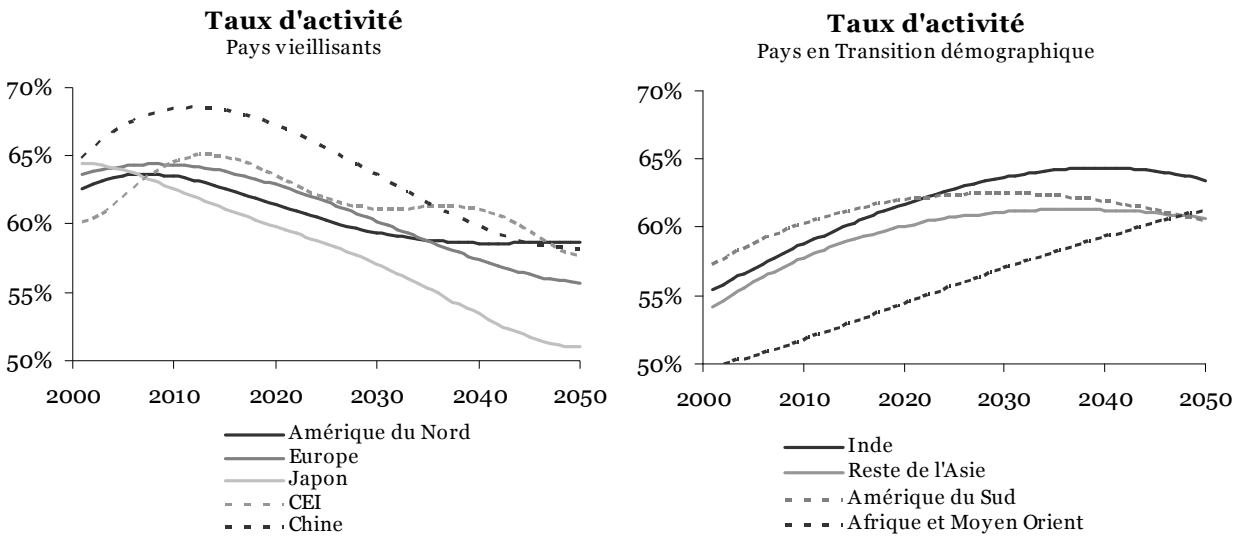


Figure 31 : Ratio de la population active sur la population totale

1.1.2 Productivité du travail

L'évolution de la productivité du travail dans chaque région suit une équation de rattrapage sectorielle à partir des valeurs de calibrage des productivités sectorielles présentées au chapitre 3 (§3.1.2). Dans chaque secteur, les gains de productivité dépendent du paramètre λ, le taux de rattrapage de l'écart entre la région leader dans ce secteur et la région considérée, et *Lev*, le niveau de rattrapage ultime entre chaque région et le leader pour chaque secteur. Ce niveau de désagrégation permet théoriquement de tenir compte des différences de vitesse du progrès technique selon les secteurs et l'existence de blocages durables au rattrapage (infrastructures, trappes à pauvreté, etc.). Néanmoins, la constitution d'un ensemble d'hypothèses à ce niveau de détail exige une expertise régionale ou sectorielle qui dépasse le champ de cette thèse, et nous adoptons ici des valeurs médianes peu différenciées, selon les principes suivants :

- La croissance de la productivité du travail des USA est égale à 1.5 % par an dans tous les secteurs ;

- Les pays développés (régions CAN, JANZ, EUR) sont supposés converger vers le niveau des USA à la vitesse de 2% par an (λ = 0.02 et *Lev* = 1) dans tous les secteurs hormis les secteurs des transports et des services, pour lesquels la convergence est plus lente, les écarts étant en général justifiés par des spécificités régionales infra-sectorielles (par ex. étalement des réseaux de transport) ;

- Chine, Inde, Brésil et Russie sont supposés converger à une vitesse légèrement supérieure, que l'on suppose égale à 3% par an. Sur un demi-siècle, cette hypothèse peut sembler plutôt optimiste. En fait elle revient à supposer (i) que le rattrapage de ces pays, particulièrement visible en Chine et en Inde, va pouvoir s'étendre à la majorité de leur population, (ii) que le secteur informel, moins efficace, va progressivement se réduire au cours des prochaines décennies, et enfin (iii) que les infrastructures et équipements nécessaire à ce rattrapage de productivité seront construites à un rythme soutenu. Pour tous les secteurs, le niveau ultime de rattrapage est maintenu égal à 0.7 pour illustrer le maintien d'activités très intensives en travail avec un coût faible de la main d'œuvre. Le niveau de rattrapage de l'agriculture en Chine, en Inde et au Brésil est abaissé à 0.5 au lieu de 1 pour illustrer le maintien d'une population rurale qui peine à se moderniser.

- Le Moyen-Orient, l'Afrique, le Reste de l'Asie et le Reste de l'Amérique Latine sont supposées converger au taux de 2% par an, mais pour illustrer les difficultés d'une partie de ces régions à quitter les trappes de pauvreté et à initier un décollage économique rapide, le niveau de rattrapage sur toute la période est maintenu égal à 0.5 pour l'Afrique et à 0.7 pour les autres régions.

De 2001 à 2007, nous disposons de données réelles sur la croissance du PIB des régions du modèle. Pour ces années, nous n'utilisons pas les équations de rattrapage. Nous calibrons les taux de croissance de la productivité de chaque région, tous secteurs confondus, pour reproduire les taux de croissance réels tels qu'ils sont calculés à partie des données du FMI[86].

1.1.3 Disponibilité de l'investissement : taux d'épargne et flux de capitaux

La croissance potentielle, telle qu'elle est rendue possible par l'expansion démographique et les gains de productivité, ne peut se réaliser que si les investissements dans les capacités de production sont suffisants et correctement alloués. La disponibilité des ressources pour investir dépend des différentes sources de financement de la croissance : épargne des ménages, ré-investissement des profits des secteurs productifs, importations de capitaux. Comme cela a été précisé au chapitre 3 (§3.1.3), l'évolution des taux d'épargne est une projection exogène en partie inspirée par des résultats du modèle INGENUE : ici, pour toutes les régions, sauf la Chine, il est maintenu constant sur le demi-siècle, tandis que pour la Chine, le taux aujourd'hui très élevé (44% en 2001) de l'épargne nationale, qui traduit en partie une épargne « forcée » par l'administration centrale chinoise, est supposé décroître fortement au cours des prochaines décennies, pour atteindre 14% en 2050.

[86] Données du World Economic Outlook 2007, deuxième semestre, disponible en ligne : http://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2007/02/weodata/index.aspx

Tableau 16 : Taux d'épargne régionaux en 2001

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

En ce qui concerne les flux de capitaux entre régions, nous adoptons l'hypothèse conventionnelle – bien que discutable – d'une convergence progressive des balances des capitaux vers zéro. Par « balance des capitaux » nous entendons la somme algébrique de toute forme de flux de capitaux, incluant les émissions de bonds du trésor, l'investissement direct (FDI), les flux de réserves de monnaies, etc. En fait, pour modéliser de manière robuste des déséquilibres de flux de capitaux persistants, il sera nécessaire de modéliser la dette nationale des régions, point qui est à l'ordre du jour des développements du modèle IMACLIM-R mais ne sera pas considéré dans le cadre de cette thèse. La règle de convergence vers une balance nulle est un cas très particulier d'équilibre des flux financiers et des dettes nationales. Elle a non seulement un impact sur l'investissement net dans chaque région, mais elle implique aussi, mécaniquement, la convergence vers zéro de la balance commerciale. Elle aura donc une incidence forte sur les effets des changements de flux d'exportation ou d'importation entre deux simulations, lesquels changements devront systématiquement être compensés par des changements opposés (en valeur) pour certains autres biens. En général ces compensations sont réalisées grâce à une modification des taux de change réels implicites dans le modèle (différences des niveaux de prix relatifs dans deux régions différentes). Ces compensations s'effectueront d'autant plus aisément que les marchés internationaux seront fluides et élastiques. Comme ce scénario de référence est supposé mettre en scène une globalisation continue et stable, nous adoptons des élasticités d'Armington assez élevées (3 pour l'arbitrage biens domestiques / biens importés ainsi que pour l'arbitrage entre exportateurs au niveau du pool mondial, 4 au lieu de 3 pour le secteur Industrie supposé plus compétitif).

1.2 Hypothèses énergétiques

Les hypothèses énergétiques portent (i) sur la disponibilité des ressources fossiles, (ii) les coûts des technologies et les effets d'apprentissage qui induisent une baisse de ces coûts au cours du temps, pour les secteurs faisant l'objet d'une description technologique détaillée, (iii), les élasticités de substitution entre énergies, pour les secteurs traités de manière agrégée. Le paramétrage retenu est celui qui a été décrit au fil de la description technique au chapitre 4, dans les parties 1.2 (ressources fossiles), 3.1 (biocarburants), 4.1 et 4.2 (production électrique), 5.1, 5.2 et 5.3 (demande finale d'énergie).

Ces hypothèses énergétiques traduisent une vision « médiane » des potentiels technologiques futurs. Dans la littérature, on peut trouver des projections technologiques plus optimistes, incorporant des technologies fondées sur un recours à l'hydrogène, à une généralisation des véhicules électriques ou aux prochaines générations de réacteurs nucléaires. Dans le même ordre d'idée, les modèles macroéconomiques dépourvus de représentation explicite des technologies font parfois des hypothèses peu robustes sur la substituabilité capital-énergie ou sur le coefficient de gain d'efficacité énergétique autonome (AEEI). Ce type d'hypothèses conduit par exemple, dans certains scénarios SRES, à une

stabilisation puis une décroissance des émissions même sans politiques climatiques dédiées (scénarios B1 et A1T). Mais pour que de telles technologies puissent être disponibles en l'absence de politiques climatiques avant 2050, il faudrait (i) qu'elles deviennent opérationnelles et compétitives grâce à un effort massif de recherche et développement, effort qui serait déclenché soit par l'existence de potentiels de profitabilité importants et peu risqués, soit par des politiques de sécurité énergétique (dans un scénario de tensions fortes et prolongées sur les ressources fossiles), (ii) que des investissements massifs – dans les moyens de production concentrée d'énergie, les réseaux et les équipements d'usage finaux – soient réalisés pour permettre une diffusion généralisée de ces technologies. Il est difficile d'exclure complètement de telles hypothèses – comme en témoignent certaines controverses récentes (Pielke et al., 2008) – mais nous pensons qu'elles constituent simultanément une borne haute de l'optimisme technologique et une borne basse du « pessimisme » sur les conditions économiques à venir, notamment sur les tensions sur les ressources fossiles. Ici nous avons adopté des hypothèses médianes pour la disponibilité des technologies et leur pénétration dans les stock d'équipements installés, par exemple en supposant que les technologies Coal-To-liquid devenaient compétitives au-delà du seuil de 100 dollars par baril de pétrole brut (ce qui ne signifie pas qu'elles se substituent instantanément au pétrole au-dessus de ce seuil puisque cela va dépendre du rythme de construction des unités de liquéfaction nécessaires).

1.3 Hypothèses de style de développement

Ce scénario est fondé sur la poursuite des tendances actuelles de développement et d'organisation spatiale, tant dans les pays développés que dans les pays en développement. La majorité des pays de l'OCDE ont suivi un schéma de développement fondé sur un exode rural massif et une urbanisation rapide, avec une expansion *étalée* des zones urbaines. Cette explosion urbaine s'est accompagnée d'un développement prioritaire du transport routier sur les courtes et longues distances puis une explosion du transport aérien. Les pays émergents ou en développement suivent généralement, eux aussi, des schémas d'organisation spatiale étalée, avec un développement peu contrôlé des grands mégapoles et une utilisation massive du transport routier. En fait, les dynamiques passées et futures de développement et d'organisation spatiale peuvent être analysées de la même manière que les dynamiques de croissance : il existe simultanément des forces de *convergence* et des forces de *divergence*. Les forces de convergence entre régions sont par exemple la diffusion des technologies et la diffusion des modes d'organisation, conditionnés en partie par les technologies existantes et les structures sociales. Les forces de divergence sont par exemple les rendements croissants (plus on est performants plus on creuse l'écart avec les autres), l'existence de seuils de décollage et la maintien de certains pays dans des « trappes à pauvreté », les particularités des usages et régimes sociaux, l'expérience acquise sur les mauvais choix passés[87], l'évolution rapide du contexte énergétique mondial qui place les pays émergents aujourd'hui dans un champ de contraintes très différent de celui que les pays développés ont connu au cours du vingtième siècle.

Nous supposons que les forces de convergence dominent et que les tendances mal contrôlées d'urbanisation et de développement de l'automobile se poursuivent dans les prochaines décennies, malgré le fait que ce « mimétisme » des styles de développement va clairement à l'encontre des leçons

[87] De même que le « leapfrogging » permet aux pays en développement de ne pas avoir à franchir toutes les étapes technologiques qui ont permis d'accéder aux technologies les plus efficaces pour adopter ces technologies, on pourrait imaginer un « effet tunnel » sur les schémas de développement et d'organisation. Cela supposerait néanmoins d'organiser un transfert d'expérience moins spontané que dans la diffusion technologique et de mettre en œuvre un contrôle probablement beaucoup plus contraignant sur l'aménagement du territoire dans les pays en développement.

de l'expérience accumulée dans les pays développés - selon lesquelles ces schémas d'organisation spatiale sont très gourmands en énergie et ne sont pas soutenables dans un contexte de tensions fortes sur les ressources énergétiques.

Dans IMACLIM-R, le style de développement est caractérisé par une série de paramètres que l'on peut regrouper en trois ensembles : l'évolution des constructions résidentielles (surfaces de logement par habitant, équipements, efficacité énergétique), l'évolution des équipements et infrastructures de transport (taux d'équipement en véhicules automobiles personnels, évolution des d'infrastructures routières et transports en commun) et enfin les besoins en fret de l'économie (transport international, déconcentration des unités de production, etc.). Ces variables reflètent de manière très agrégée les choix d'organisation et de développement urbain. Leur évolution est représentée de manière compacte et simplifiée puisqu'elles sont soit exogènes soit reliées à la croissance du revenu moyen par habitant. En pratique, on les considère comme des données de scénario, alors qu'elles relèvent, dans le monde réel, des interactions complexes entre choix politiques, décisions microéconomiques, structure des institutions – régime foncier par exemple – et fonctionnement des marchés (immobilier, crédit aux particuliers, etc.).

1.3.1 Evolution du parc résidentiel

Pour traduire l'hypothèse de mimétisme des styles de développement, nous avons supposé que les niveaux de surface résidentielle par habitant étaient croissants dans toutes les régions du monde. Dans les pays de l'OCDE, cette croissance reste modérée mais significative parce que les niveaux sont déjà élevés en début de période et l'on estime que tous les pays sont proches de leur asymptote. Parmi ces pays on différencie nettement le mode de développement d'Amérique du Nord avec des niveaux approchant 80 m^2 par habitant et celui de l'Europe et du Japon, où les surfaces par habitant sont deux fois moins élevées. La CEI et le Moyen-Orient connaissent tous deux une forte croissance des surfaces par habitant, s'acheminant plus vers un mode d'organisation étalé. Dans les PED, tous caractérisés par des niveaux de départ plus faibles, les surfaces par habitant croissent de manière soutenue, mais on suppose que le gigantisme des mégalopoles sature la surface par habitant à un niveau relativement bas par rapport aux asymptotes des pays de l'OCDE. Le niveau atteint en 2050 se rapproche du niveau actuel du Japon.

Tableau 17 : surface de logement (m^2 par habitant)

	2005	2030	2050
Amérique du Nord	58	62	69
Europe élargie	33	40	44
OCDE Pacifique	29	33	36
CEI	27	46	52
Chine	20	23	29
Inde	8	12	19
Brésil	11	16	23
Moyen-orient	20	27	39
Afrique	11	15	22
Reste de l'Asie	18	23	31
Reste de l'Amérique Latine	12	16	24

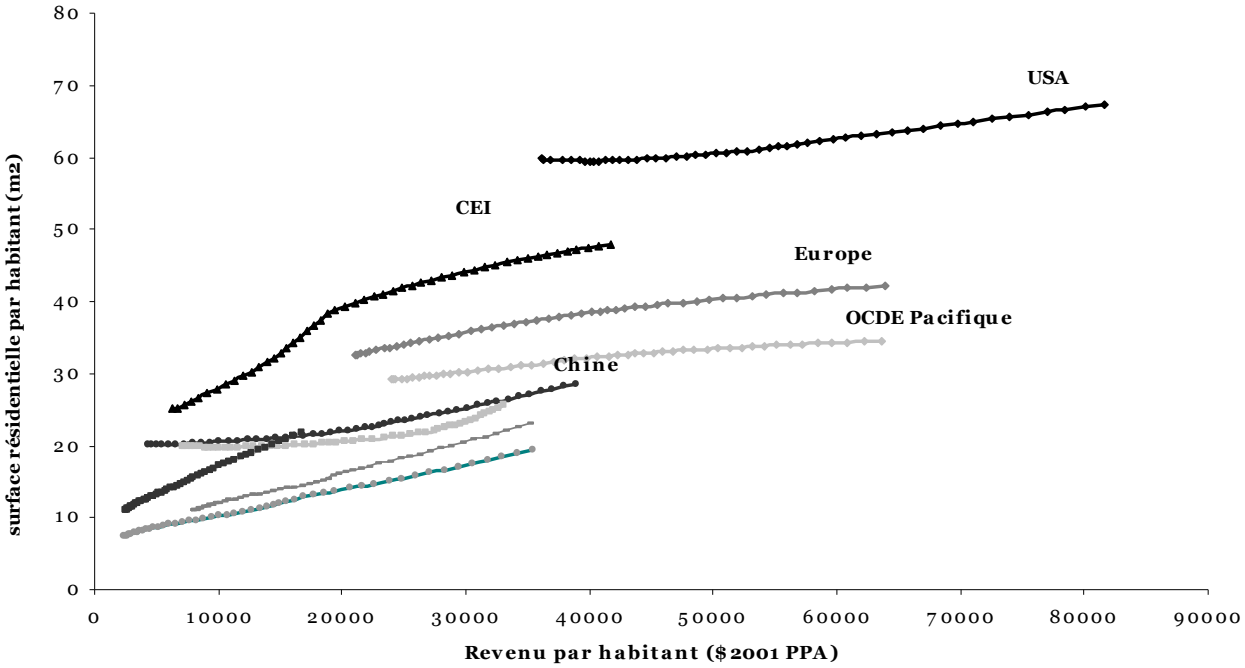


Figure 32 : Evolution des PIB par habitant en fonction de celle du PIB PPA par habitant (résultats IMACLIM-R)

Compte tenu de la forte croissance démographique des PED, les surfaces de logements à construire que supposent l'évolution des surfaces par habitant, ajoutées à une dépréciation moyenne de 1% par an, sont très importantes, aussi bien pour la Chine que pour d'autres régions en développement (Inde, Afrique, reste de l'Asie). Notons que pour la Chine, nos chiffres restent en deçà des annonces officielles du gouvernement – 20 milliards de m2 à construire entre 2005 et 2020.

Tableau 18 : Surface résidentielle construite (M^{ards} de m^2 par an, démolition 1,5% par an incluse)

	2005-2015	2015-2025	2025-2035	2035-2045
USA	3.5	3.8	4.1	4.5
Canada	0.5	0.6	0.7	0.8
Europe élargie	3.9	4.2	4.6	3.7
OCDE Pacifique	1.0	1.1	1.1	0.8
CEI	2.3	2.8	2.8	1.5
Chine	**5.2**	**5.7**	**6.2**	**6.8**
Inde	3.7	4.9	**6.5**	**8.6**
Brésil	0.7	0.9	1.2	1.4
Moyen-orient	1.6	2.2	2.9	3.8
Afrique	4.7	**6.5**	**8.8**	**12.1**
Reste de l'Asie	**6.1**	**7.6**	**9.5**	**11.8**
Reste de l'Amérique Latine	1.6	2.0	2.5	3.2

Pour traduire la rétroaction de la croissance économique sur le développement urbain dans les scénarios *avec politiques* dans les prochains chapitres, nous avons calibré une relation entre la surface par habitant et le PIB par habitant (PPA) qui respecte nos hypothèses de référence.

1.3.2 Evolution des équipements et infrastructures de transport

La dynamique des transports dépend fortement de l'équipement des ménages en véhicules personnels et du développement des infrastructures.

Nous supposons que les stocks de véhicules personnels croissent tout au long du demi-siècle dans toutes les régions, à l'exception des USA, que nous considérons déjà proches de la saturation. Dans tous les autres pays, nous supposons que les niveaux augmentent progressivement tant qu'il n'y a pas saturation au même niveau que les USA. Cela se traduit par une expansion particulièrement importante du parc de véhicules dans les pays émergents ou en développement. Deux hypothèses sous-tendent ce scénario : (i) l'effet positif de la croissance du revenu sur l'achat de véhicules individuels reste largement dominant sur l'effet prix d'un coût kilométrique croissant, comme c'est le cas aujourd'hui[88] ; (ii) les pays émergents et en développement font le (non-)choix d'un développement massif des infrastructures de transport automobile en zone urbaine et pour les transports interurbains. Dans le modèle, en l'absence de politiques climatiques dédiées, la politique d'infrastructure de transports routiers est supposée « suivre » la demande de service de transports et satisfaire à la fois la préférence des ménages pour le transport routier et le besoin de transport de fret routier. Les pays de l'OCDE sont supposés entretenir et maintenir le stock existant, jugé suffisant pour absorber la demande future, tandis que dans les pays en développement, la croissance très importante de la mobilité automobile exige un déploiement massif d'infrastructures routières.

En 2050, les taux d'équipement sont compris entre 130 et 320 véhicules pour mille habitants dans toutes les régions en développement, alors que ce taux avoisine 550 véhicules pour mille habitants dans les pays industrialisés, sauf les Etats-Unis (700 pour mille).

Tableau 19 : Equipements des ménages en véhicules particuliers (véhicule par habitant)

	2005	2030	2050
USA	0.68	0.69	0.69
Europe élargie	0.38	0.48	0.54
OCDE Pacifique	0.38	0.47	0.52
CEI	0.13	0.31	0.40
Chine	0.02	0.10	0.17
Inde	0.01	0.07	0.17
Brésil	0.10	0.21	0.32
Moyen-orient	0.07	0.19	0.26
Afrique	0.02	0.05	0.13
Reste de l'Asie	0.02	0.07	0.15
Reste de l'Amérique Latine	0.08	0.21	0.32

Le parc mondial d'automobiles passe de 675 millions en 2000 à 2,1 milliards en 2050. Mais en 2050, la répartition géographique du parc mondial est nettement modifiée : les pays industrialisés (y compris la CEI) ne compteraient plus que pour 53 % du parc mondial de véhicules en 2030 et 38 % en 2050, contre 80 % aujourd'hui. En 2050, le parc de l'OCDE n'a augmenté que de 50% par rapport à

[88] Il faut rappeler que l'impact de la croissance du prix du pétrole sur les prix de l'essence est considérablement amorti par la fiscalité : par exemple, en France, le doublement du prix du pétrole de 60 $/bl aujourd'hui à 120 $/bl en 2050, avec un taux de change euro-dollar constant, n'entraîne qu'une augmentation de 34 % du prix de l'essence, de 1,28 à 1, 71 €/l.

aujourd'hui, tandis que dans les pays émergents – Chine, Inde, Brésil – le parc a été multiplié par 11. Les parcs de véhicules de l'Inde et de la Chine réunies représenteraient à eux seuls 600 millions de véhicules, soit presque la totalité du parc mondial en 2000. En 2050 il y aurait dans le monde 3,3 fois plus de véhicules automobiles qu'aujourd'hui.

1.3.3 Besoins en fret de l'économie

Dans IMACLIM-R, les besoins en fret de l'économie sont conditionnés par deux types de paramètres : le coefficient de transport international nécessaire à chaque importation $nit_{j,i,k}$, ainsi que les coefficients intermédiaires de consommation de transport dans tous les secteurs productifs $CI_{i,j,k}$ (avec i = transports terrestre, aérien et maritime). Les paramètres de transport international $nit_{j,i,k}$ ne sont pas modifiés au cours de la simulation, en cohérence avec l'hypothèse mentionnée plus haut d'une poursuite de la globalisation des marchandises et des services. Les paramètres de consommation intermédiaire de transport dans la production des biens et services sont modifiés ainsi :

- pour le transport aérien, dans lequel les transports de passagers sont majoritaires, la consommation unitaire de transport aérien par bien produit diminue au même rythme que l'intensité en travail, ce qui permet de plafonner la quantité de voyages professionnels par travailleur,
- pour le transport maritime et terrestre, nous supposons que la consommation unitaire de transport suit une courbe d'efficacité croissante autonome, que nous avons supposé égale aux gains énergétiques moyens dans chaque région, faute de données supplémentaires (Chapitre 4, §5.3.3).

2 Des hypothèses de scénario à la trajectoire réalisée : les mécanismes moteurs de la hausse des émissions

Le scénario de référence calculé à partir des paramètres détaillés ci-dessus conduit à une croissance continue des émissions de CO_2 mondiales, de 6.4 gigatonnes de carbone en 2001 à 17.5 gigatonnes de carbone en 2050 (ou de 24 à 64 $GtCO_2$), soit une multiplication par 2.7 en un demi-siècle. Cette croissance des émissions est largement alimentée par les pays émergents ou en développement (30 $GtCO_2$ soit 75% de l'augmentation globale et un rythme de 3.1% par an).

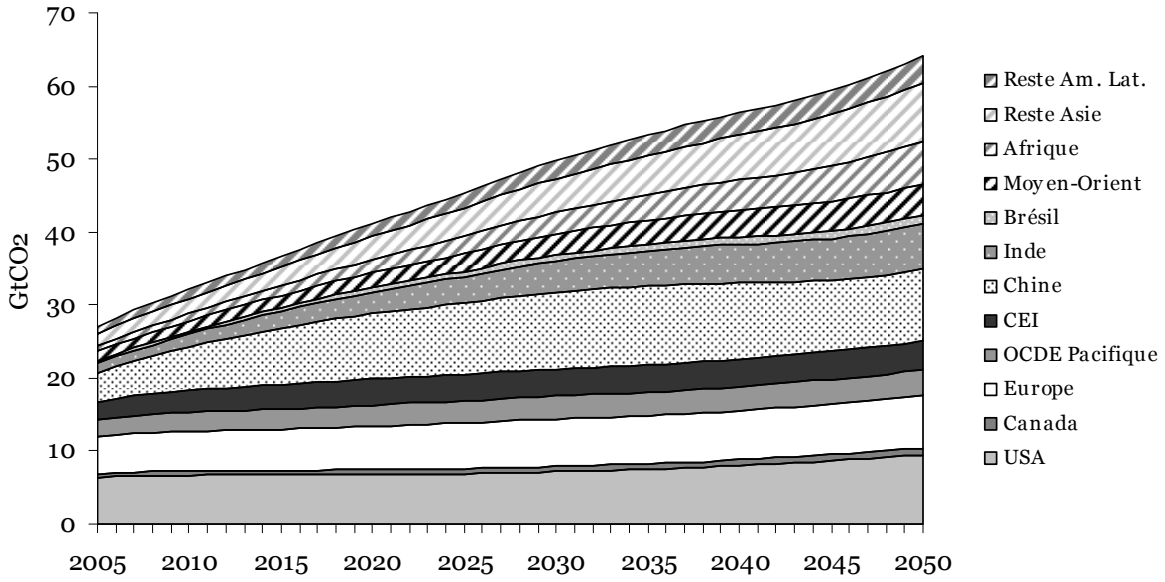


Figure 33 : Emissions régionales

La décomposition de Kaya appliquée au niveau mondial fournit les éléments suivants :

- La population mondiale est multipliée par 1,5 ;
- Le PIB par habitant mondial agrégé en parités de pouvoir d'achat est multiplié par 3,14 tandis que le PIB nominal par habitant est multiplié par 3,4 ;
- L'intensité énergétique du PIB mondial est réduite de 35% par rapport à sa valeur de 2000 ;
- L'intensité carbone du panier d'énergie primaire mondial est réduite de 11% par rapport à 2000.

Le récit sous-jacent à notre scénario de référence le rend comparable *a priori* aux scénarios SRES de la famille A1, fondés sur une globalisation continue et une convergence rapide des pays en développement. Il faut noter cependant que nos hypothèses de croissance et de convergence restent relativement modestes sur la convergence des pays les moins avancés, notamment parce que nous avons projeté un rattrapage de productivité partiel dans certains secteurs et que nous avons raisonné en parités de pouvoirs d'achat (vs. calculs en parités de taux de change dans l'exercice SRES). Il est donc logique que notre scénario présente une croissance mondiale moins élevée que dans les scénarios A1. Les indicateurs énergétiques – intensité énergétique et intensité carbone – rapprochent notre scénario des sous-familles A1C et A1G, fondés sur des systèmes énergétiques dominés respectivement par le charbon (A1C) ou le pétrole et le gaz (A1G). De ce point de vue là, notre scénario se rapproche aussi des scénarios de la famille A2, fondés sur une vision plus hétérogène du monde mais incluant aussi un recours important aux énergies fossiles (Tableau 20 et Figure 34).

Tableau 20: Comparaison du scénario de référence avec les scénarios SRES A1C, A1G et A2

	PIB par habitant	Intensité énergétique	Intensité carbone
A1C AIM	4.78	0.51	1.13
A1C MESSAGE	4.91	0.48	0.89
A1C MINICAM	4.16	0.60	1.00
A1G AIM	4.85	0.53	1.01
A1G MESSAGE	4.91	0.52	0.85
A1G MINICAM	4.19	0.61	0.92
IMACLIM-R	**3.14 (PPA)** **3.4 (US$)**	**0.65**	**0.89**
A2 ASF	1.77	0.83	0.89
A2 AIM	1.74	0.74	1.01
A2 MESSAGE	1.77	0.78	0.87
A2 MINICAM	1.73	0.74	0.95
A2-A1 MINICAM	1.32	0.79	0.90
A1C AIM	4.78	0.51	1.13
A1C MESSAGE	4.91	0.48	0.89

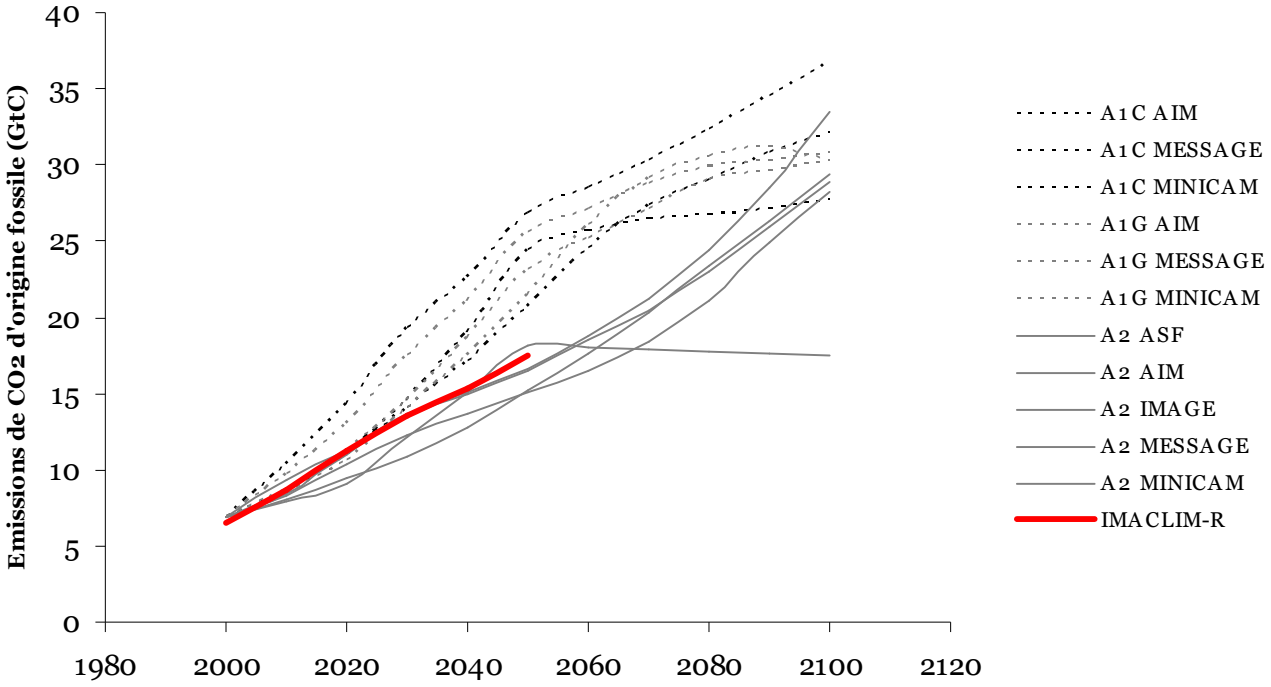


Figure 34 : Trajectoire d'émissions de référence d'IMACLIM-R et scénarios SRES sélectionnés

La définition du scénario de référence est déterminante pour l'évaluation de l'efficacité et du coût des politiques de réduction des émissions. Le scénario que nous avons généré se situe parmi les scénarios A1C, A1F et A2 qui représentent la partie haute de l'intervalle d'incertitude sur les émissions tel qu'il est exprimé par l'éventail des scénarios SRES ou par la base de scénarios que nous avons présentée au premier chapitre de cette thèse. On pourra objecter dans la suite de la thèse que le choix d'un tel scénario comme *unique* référence pour réexaminer les modalités de l'évaluation des politiques de réduction peut introduire un biais dans les résultats finaux. Certes, mais nous soutenons ici l'idée que l'adoption de ce scénario de référence n'est le fruit ni du hasard, ni d'une intention d'orienter les résultats de l'évaluation numérique : il s'agit là d'un *vrai scénario médian* par rapport aux incertitudes économiques et techniques. En quelque sorte, nous soutenons ici, comme Pielke et al. (2008), que les scénarios SRES qui supposent, sans politiques climatiques explicites, une stabilisation « autonome » des émissions d'ici 2050, puis une décroissance dans la seconde partie du 21ème siècle, sont peu plausibles. L'analyse plus détaillée du scénario de référence permet d'étayer cet argument.

2.1 Un atterrissage progressif de la croissance mondiale avec rattrapage partiel des PED

Notre scénario de référence est caractérisé par une croissance mondiale soutenue : 4.8% par an entre 2005 et 2020, puis 3.4% jusqu'en 2050 (

Tableau 21). Jusqu'en 2020, cette croissance est principalement alimentée par les pays émergents, en particulier la Chine et l'Inde, qui croissent respectivement à un taux annuel moyen de 7.7% et 8.9% sur la période, ce qui correspond à 37% de la croissance mondiale (Tableau 22). Cette projection s'inscrit dans la suite logique des faits économiques récents : comme le montre la Figure 35 tirée du World Economic Outlook (IMF, 2007), la Chine et l'Inde ont été responsables de 40% de la croissance mondiale des deux dernières années. Dans notre scénario, ce dynamisme continue pendant les quatre décennies suivantes, à ceci près qu'au-delà de 2020 les autres pays en développement prennent partiellement le relais des grands pays émergents actuels. Contrairement à ce qui apparaît

dans la majorité des scénarios publiés, la Chine et la CEI connaissent un ralentissement important lié à l'essoufflement progressif du rattrapage mais surtout à leur démographie, mêlant vieillissement accéléré et très faible natalité.

Tableau 21 : Taux de croissance annuel moyen du PIB réel (PPA)

	2005-2020	2020-2050
Monde	**4.8%**	**3.4%**
OCDE hors CEI	**2.6%**	**2.2%**
USA	2.3%	2.3%
EUR	2.9%	2.2%
Pays émergents	**7.3%**	**3.7%**
CEI	4.8%	2.5%
Chine	7.7%	2.7%
Inde	8.9%	5.4%
Brésil	4.5%	3.7%
Autres PED	**6.0%**	**4.6%**

Tableau 22 : Contribution à la croissance mondiale

	2005-2020	2020-2050
OCDE hors CEI	**25%**	**21%**
USA	8%	8%
EUR	12%	9%
Pays émergents	**49%**	**43%**
CEI	4%	3%
Chine	28%	15%
Inde	15%	22%
Brésil	2%	3%
Autres PED	**25%**	**36%**

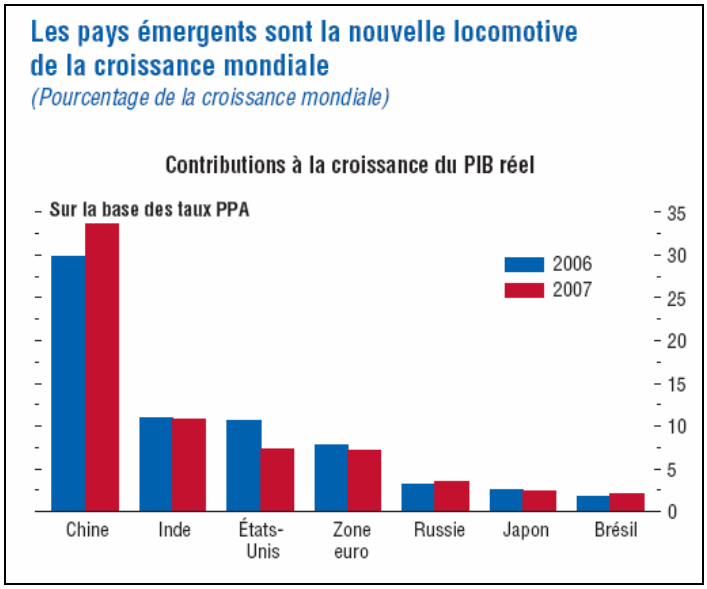


Figure 35 : Contribution des pays/régions à la croissance mondiale en 2006 et 2007 (IMF, 2007, *xi*)

Ce schéma de croissance découle de nos hypothèses de rattrapage des niveaux de productivité sectorielle des pays en développement. L'examen de l'évolution de la productivité effective du travail au niveau de chaque région montre bien des périodes de rattrapage intense pour la CEI, la Chine et l'Inde (Figure 36), semblables aux phases d'industrialisation mises en évidence dans le passé avec les données compilées par A. Maddison (cf. Chapitre 2, Figure 2). Les autres régions constituées de pays en développement très hétérogènes (par exemple la région RAS couvre à la fois Bangladesh, Thaïlande et Vietnam) ne connaissent pas de rattrapage aussi rapide mais conservent un taux de croissance de la productivité à 4% par an pendant presque toute la période.

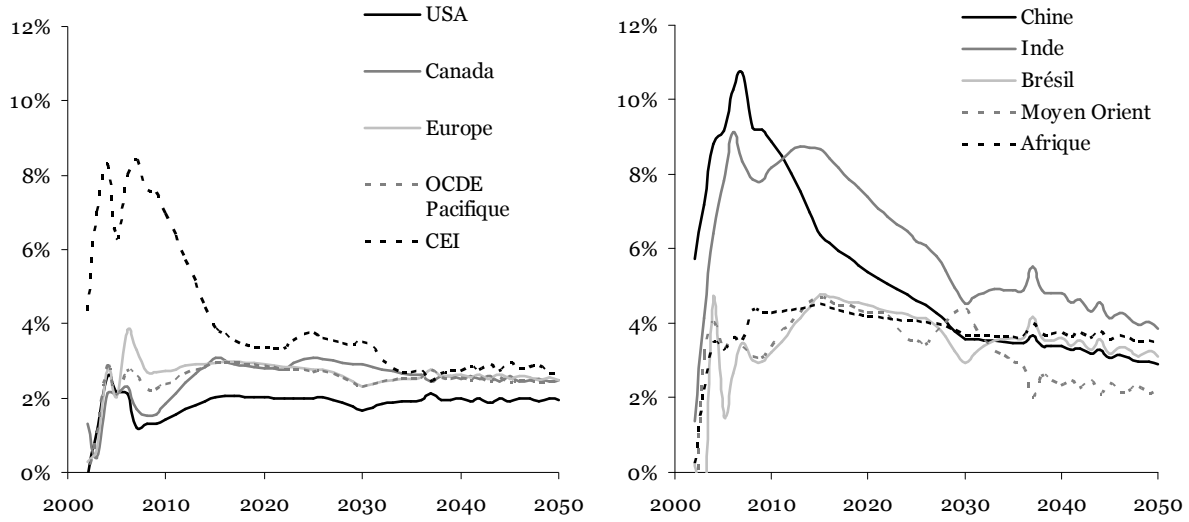


Figure 36 : Taux de croissance effectif de la productivité agrégée du travail à l'échelle régionale
Note : le taux de productivité agrégée du travail est calculé comme le ratio du PIB en PPA par la population en activité

Du fait de ce rattrapage, une majeure partie des pays en développement aura atteint en 2050 le niveau de PIB moyen par habitant des USA en 2000 (36000 dollars PPA par habitant) ; seules les régions *Afrique* et *Reste de l'Asie* sont encore à la traîne avec des revenus par habitant respectifs de 16600 et 21200 dollars PPA, mais ce dernier niveau correspond quand même au revenu moyen par habitant en Europe en 2000. Le retard persistant qui caractérise ces larges régions géographiques peut masquer des situations très hétérogènes, dans lesquelles une partie des pays inclus dans ces régions connaissent un décollage plus rapide, mais où une grande part de la population reste pauvre, dans des régions avec un faible niveau d'infrastructures, des situations climatiques difficiles (voire de plus en plus difficiles à la fin de la période), ou encore des régimes institutionnels peu favorables à un développement économique partagé.

A l'échelle globale, cependant, le résultat immédiat d'un tel scénario de rattrapage est la poursuite de la réduction des inégalités interrégionales. Depuis 1980, les inégalités de répartition entre pays, mesurées en parités de pouvoir d'achat, diminuent progressivement, contrairement à ce que les données nominales pourraient laisser croire (Figure 37). Notre scénario de référence poursuit clairement cette tendance, comme le montre l'évolution de la courbe de Lorentz des revenus mondiaux (Figure 38).

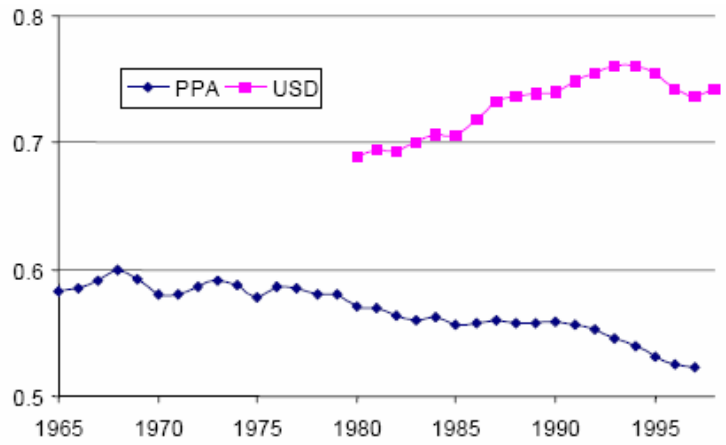


Figure 37 : Coefficient de Gini mondial – évolution historique (source : Melchior, 2001)

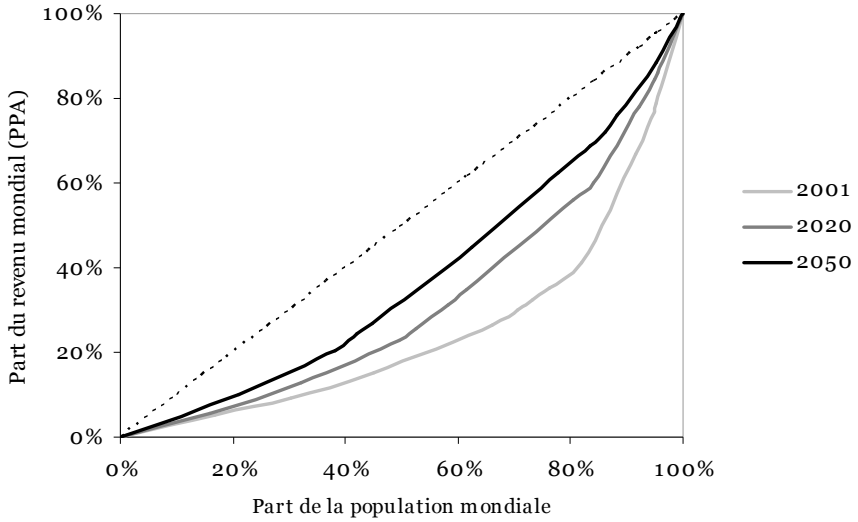


Figure 38 : Evolution de la répartition des revenus mondiaux (résultats IMACLIM-R PPA)

Construit à partir d'hypothèses médianes sur la croissance de la productivité des pays « leaders » et sur la vitesse de rattrapage des pays en développement, notre scénario de référence fournit donc un tableau plutôt optimiste sur la croissance globale des régions du monde. Un tel scénario ne nous dit rien explicitement sur la répartition des revenus au sein de chaque région. Mais étant donné nos hypothèses de rattrapage de la productivité moyenne des secteurs dans chaque région, nous devons supposer que le progrès technique, l'amélioration des conditions de vie, le niveau d'instruction des individus et la croissance des revenus concernent une majeure partie des populations concernées. Rien n'exclut qu'il existe des pays ou des couches de population qui restent à l'écart de la croissance, comme c'est le cas dans certains pays industrialisés, mais notre scénario de rattrapage n'est pas compatible avec un monde fragmenté dans lequel une partie *importante* de la population resterait privé de ces progrès. Si nous devions concevoir un scénario alternatif à celui-ci, nous choisirions précisément d'adopter des hypothèses de blocage à la croissance, de maintien d'une dualité forte dans les sociétés en rattrapage, dans un style plus proche des scénarios SRES des familles B1 et B2.

2.2 Le contenu matériel et énergétique de la croissance reste élevé

L'évolution du PIB fournit une mesure simple et globale de l'évolution du dynamisme de l'économie mondiale, mais elle ne fournit qu'une information limitée sur les conséquences matérielles de la croissance. Pour cela, il convient d'analyser plus finement la structure du PIB et de la demande finale, ainsi que les évolutions des équipements et des infrastructures qui contribuent cette croissance et l'orientent dans des directions plus ou moins intensives en matériaux. La structure du PIB évolue différemment selon les régions :

- Dans les pays industrialisés – USA, Canada, Europe et OCDE pacifique – la structure évolue peu au cours des décennies à venir. La saturation des biens d'équipements et la compétition internationale font stagner la part de l'industrie en dessous de 25% et l'économie reste dominée aux deux tiers par le secteur des services.
- Dans la CEI, le fait marquant est la place prépondérante et croissante qu'occupe la production d'énergie, tandis que les parts respectives de l'agriculture et l'industrie diminuent pour se limiter à 12% et 16% en 2050 et que l'économie se tertiarise lentement. Cette structure et son évolution sont très similaires à celles du Moyen-Orient.
- Au Moyen-Orient, la production d'énergie occupe aussi une place très importante, mais qui s'amenuise à la fin du demi-siècle, du fait de la baisse de la production de l'OPEP et de l'exploitation croissante des ressources non conventionnelles hors du Moyen-orient. La part de l'industrie diminue au profit de celle des services.
- Au Brésil, l'énergie occupe une place grandissante, soutenue par la demande mondiale de pétrole et de biocarburants, et l'économie s'industrialise significativement (+5% de part de PIB en 2050).
- L'économie chinoise reste dominée par la production industrielle, pour satisfaire à la fois une demande domestique très dynamique et des exportations soutenues ; la diminution de 8% de la part de l'agriculture est à peu près compensée par la montée des services.
- En Inde, le développement de l'économie de services se poursuit, simultanément à une industrialisation régulière et une diminution de plus de la moitié de la part de l'agriculture.
- En Afrique, l'industrie et les services occupent une place croissante au détriment de l'agriculture et, dans une moindre proportion, de la production d'énergie. La valeur ajoutée des secteurs de production d'énergie est dopée dans les trois premières décennies par la hausse des prix mondiaux du pétrole, source de revenus supplémentaires tant que les réserves de l'Afrique restent importantes.
- Enfin, à l'échelle globale du reste de l'Asie et de l'Amérique Latine, la structure du PIB reste relativement stable, avec une baisse de la part de l'agriculture et une augmentation de la part de l'énergie et de celle des services.

Au niveau mondial, la part des services dans l'activité économique globale augmente relativement peu tandis que la part de l'industrie se maintient à 25% du total et que la valeur ajoutée liée à la production d'énergie passe de 5% à 9%. Dans notre scénario de référence, le changement structurel des économies ne conduit donc pas à une dématérialisation significative de l'économie, en tous cas du point de vue de la structure du PIB (la part de l'énergie est par exemple gonflée par la hausse des prix de l'énergie tout au long de la trajectoire).

Tableau 23 : Structure du PIB par région

		2000	2020	2050
OCDE Hors CEI	Agriculture	5%	5%	5%
	Energie	3%	4%	4%
	Industrie	24%	25%	23%
	Transport	4%	4%	4%
	Services	64%	63%	65%
CEI	Agriculture	15%	13%	12%
	Energie	26%	33%	30%
	Industrie	23%	22%	16%
	Transport	5%	4%	5%
	Services	30%	27%	36%
Chine	Agriculture	21%	16%	13%
	Energie	10%	12%	11%
	Industrie	43%	47%	45%
	Transport	3%	3%	3%
	Services	22%	22%	28%
Inde	Agriculture	27%	20%	13%
	Energie	12%	14%	12%
	Industrie	19%	22%	24%
	Transport	6%	6%	9%
	Services	37%	37%	42%
Brésil	Agriculture	9%	10%	9%
	Energie	6%	9%	9%
	Industrie	26%	29%	31%
	Transport	2%	2%	2%
	Services	57%	51%	50%
Moyen-Orient	Agriculture	9%	8%	7%
	Energie	21%	31%	26%
	Industrie	20%	17%	16%
	Transport	6%	5%	5%
	Services	44%	40%	46%
Afrique	Agriculture	23%	20%	14%
	Energie	17%	20%	14%
	Industrie	19%	20%	26%
	Transport	5%	5%	6%
	Services	37%	35%	41%
Reste du monde	Agriculture	14%	12%	9%
	Energie	8%	11%	10%
	Industrie	25%	25%	25%
	Transport	7%	8%	9%
	Services	47%	45%	47%

Pour compléter le tableau des déterminants du contenu matériel et énergétique de la croissance, il est intéressant d'analyser la demande finale d'énergie des ménages :

- Les besoins énergétiques totaux par m^2 sont stables ou diminuent dans les pays développés, au Moyen-Orient et au Brésil ; ils augmentent en Chine (x2.3), en Inde (x1.3), en Afrique (x1.4) et dans le reste des pays en développement (x1.5), régions dans lesquelles les progrès d'efficacité énergétiques sont moindres que la croissance des services énergétiques par m^2.

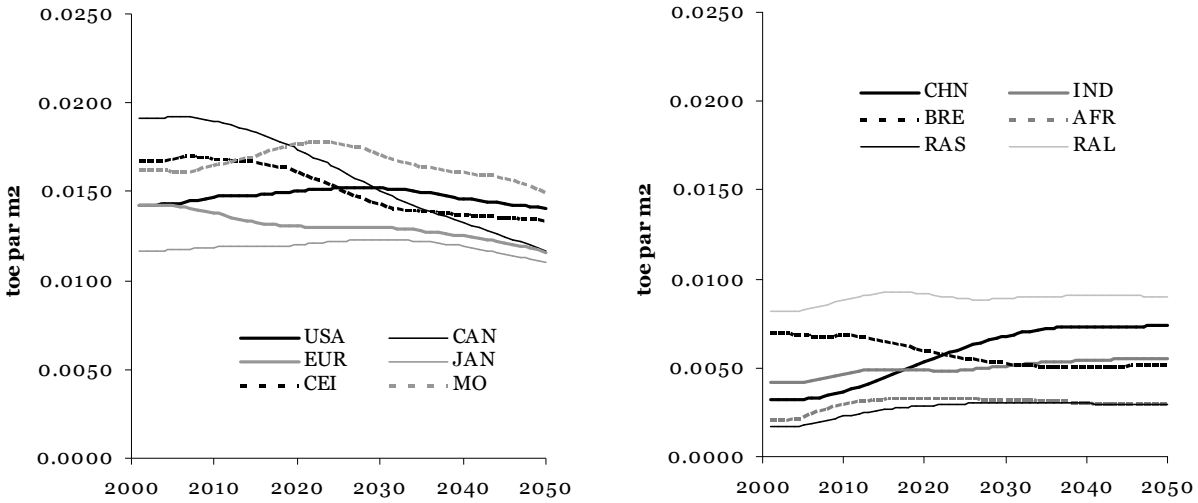


Figure 39 : Evolution des besoins énergétiques unitaires par m2 (résultats IMACLIM-R)

- La demande mondiale de mobilité est en forte croissance : la motricité motorisée – voiture individuelle, autres transports terrestres, transport aérien – est multipliée par 4.5, mais la situation est très différente selon les régions : les pays industrialisés connaissent une augmentation de leur mobilité de 110% seulement, tandis que la mobilité totale est multipliée par 17 en Chine, par 15 en Inde et par 8 en moyenne dans le reste du monde. Dans les pays industrialisés, c'est la croissance de la demande de transport aérien qui fait augmenter la mobilité, les autres modes étant contraints par le budget temps des ménages[89]. En Chine et en Inde, la mobilité en véhicule particulier explose, elle atteint respectivement 6000 ou 4000 kilomètres par habitant et par an (à comparer aux 8000 en Europe en 2000), encouragée par le développement continu des infrastructures routières (multipliées par 4.4 en Chine par exemple) et l'explosion du stock de véhicules, malgré 40% de gains d'efficacité en 50 ans. La mobilité aérienne est multipliée d'un facteur 15 à 25 dans tous les pays émergents ou en développement. Le Tableau 24 fournit l'ensemble des résultats pour les 12 régions du modèle. Globalement, les pays en développement rattrapent partiellement les niveaux de mobilité, en suivant des trajectoires comparables (Figure 40).

[89] L'aspiration à la mobilité aérienne très rapide aboutit même à faire décroître légèrement la quantité globale de transport collectif terrestre aux USA et au Canada, pays dans lesquels un large développement du train grande vitesse n'est pas envisagé.

Tableau 24 : Evolution du transport motorisé par habitant entre 2000 et 2050 (pkm)

	Véhicule individuel		Transport collectif		Transport aérien	
	2001	2050	2001	2050	2001	2050
USA	21762	22188	1919	1662	1142	9765
Canada	9276	13880	5637	4448	1033	8824
Europe	7876	14442	1975	3932	354	3677
OCDE Pacifique	8254	14510	3112	4106	569	6970
CEI	2373	13342	812	1903	43	1009
Chine	287	5906	178	1493	2	33
Inde	145	4017	655	3642	6	94
Brésil	1647	8276	1565	5026	105	937
Moyen-Orient	1289	8044	6600	7205	166	1634
Afrique	467	4633	588	2322	17	197
Reste Asie	543	5972	1232	5023	41	568
Reste Am. Lat.	1782	9663	2537	6040	213	2734

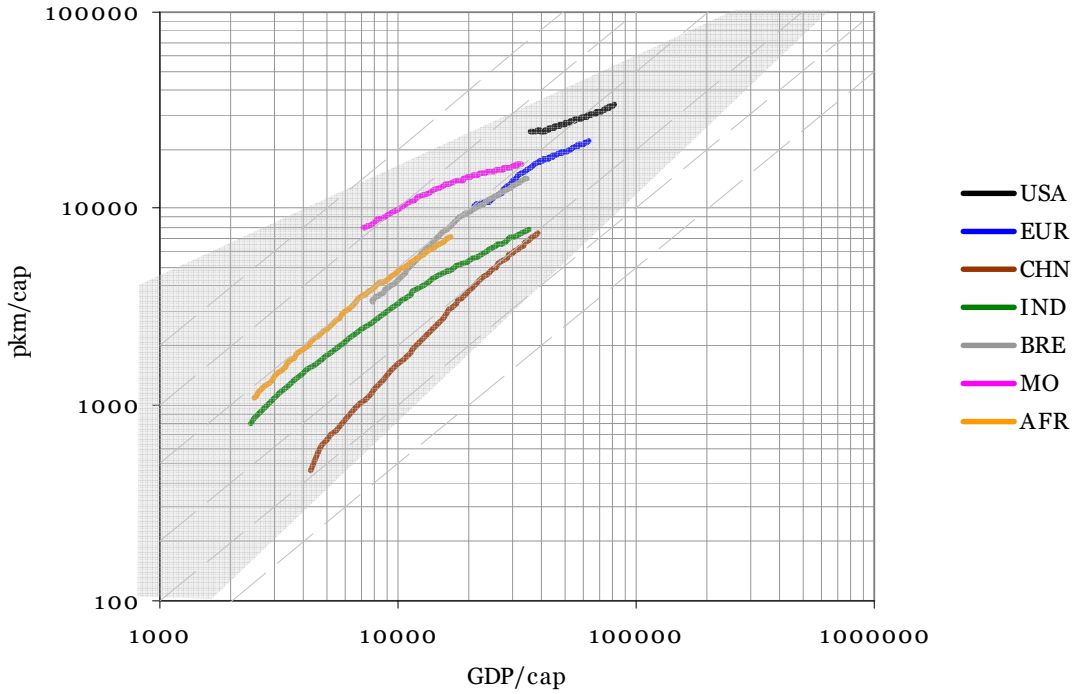


Figure 40 : Mobilité totale motorisée par habitant en fonction du PIB par habitant (échelle logarithmique)

2.3 Des tensions croissantes sur les marché énergétiques

Compte tenu des dynamiques des indicateurs d'activité décrites dans les paragraphes précédents, les progrès d'efficacité énergétique ne sont pas suffisants pour empêcher les marchés énergétiques de rentrer dans une période de fortes tensions. La demande d'énergie primaire (TPES) mondiale est multipliée par 3, passant de 9000 Mtep en 2000 à 27 000 Mtep en 2050. Les Etats-Unis, la Chine, l'Inde, l'Afrique et le Reste de l'Asie comptent chacun pour 12 à 15% de l'augmentation de la TPES mondiale. La part des pays en développement et émergents dans la demande totale passe de 34%

aujourd'hui à 58% en 2050. Malgré un certain rattrapage, les niveaux de demande totale d'énergie primaire par habitant dans les PED restent largement inférieurs à ceux des pays de l'OCDE : la Chine et l'Inde atteignent respectivement 2.6 et 1.6 tep/hab en 2050, tandis qu'en Europe et aux Etats-Unis la demande monte respectivement à 5.4 et 10.8 tep/hab.

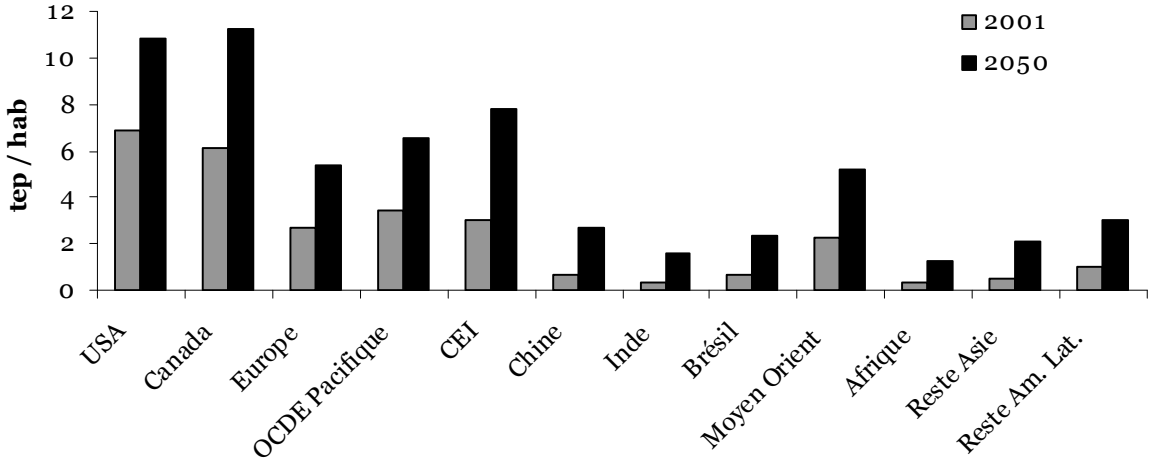


Figure 41 : Demande totale d'énergie primaire par habitant, 2000 et 2050, scénario de référence.

Dans les pays de l'OCDE, l'augmentation des besoins en énergie finale est d'abord le fait des secteurs de l'industrie et de la construction, responsables de 42% de l'augmentation, puis des transports (26%) et du secteur composite (20%). Pour les pays émergents ou en développement, la part des services est moindre (13%), le transport est responsable de 30% de la demande supplémentaire, l'industrie de 38% et le résidentiel de 9%.

Côté offre, le surcroît des besoins énergétiques mondiaux en 2050 est satisfait à 44% par du charbon, à seulement 9% par du pétrole et 12% par du gaz, mais le nucléaire et les énergies renouvelables assurent respectivement 24% et 11% des besoins supplémentaires. La production d'électricité nucléaire est donc multipliée par 9 en 2050, tandis que la production à partir de renouvelables hors hydroélectricité passe de 28 Mtep à 2000 Mtep. Cette impressionnante croissance est majoritairement assurée par le développement massif des agrocarburants, comme substituts au pétrole, surtout après 2030. En 2050 les agrocarburants assurent 20% de la production de carburant liquide avec 1260 Mtep : le potentiel maximum dans le modèle, fixé à 1400 Mtep, est quasiment atteint.

L'évolution des prix mondiaux des ressources fossiles reflète clairement les modifications de la composition du panier des carburants (Figure 42). Le prix du pétrole brut croît rapidement – 4% par an en moyenne – pour atteindre 80 dollars par baril dès 2013[90]. La mise en production massive d'agrocarburants (éthanol et oléagineux), supposé rentables pour ce seuil de prix, stabilise les prix à ce niveau jusqu'en 2030, phase durant laquelle la production d'agrocarburants ne s'ajoute qu'à la marge à la production de pétrole toujours croissante. En 2030, la production de pétrole brut – toutes ressources confondues – fléchit puis décroît. La production d'agrocarburants est alors utilisée comme véritable substitut et connaît une croissance beaucoup plus rapide[91]. Mais cette croissance rapide ne

[90] Un tel scénario paraît déjà caduc au vu des récentes envolées du prix du brut en 2007 et en 2008. Il nous faut préciser que ce scénario repose sur des hypothèses de fonctionnement raisonnable du marché des hydrocarbures. Concrètement, nous ne prenons en compte ni les effets de spéculation sur les matières premières, ni les restrictions volontaires de capacités de production qui peuvent expliquer aujourd'hui la flambée des prix.

[91] La version actuelle du modèle ne permet pas de prendre en compte la compétition pour l'usage des sols qu'une telle mise en production induirait. Sous l'effet d'une compétition accrue pour mettre les sols en culture, on pourrait assister à une hausse progressive des prix à cause de l'augmentation de la rente foncière. Par ailleurs,

suffit plus à maintenir le prix au seuil de 80 dollars le baril, ce qui relance la croissance du prix du pétrole pendant une décennie, jusqu'au second seuil de 100 dollar le baril. A ce prix, la production de carburant liquide à partir de charbon est supposée rentable, le prix du charbon étant relativement stable. En 2050, ce substitut assure 6% de la production totale (Figure 43).

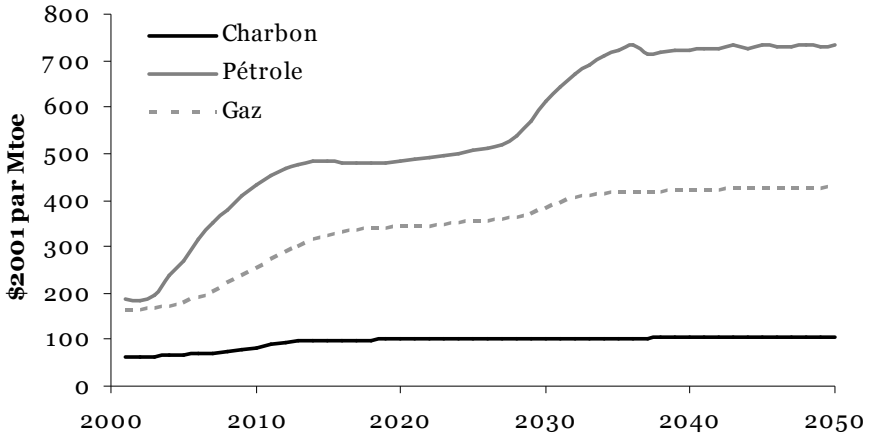


Figure 42: prix mondiaux des ressources fossiles

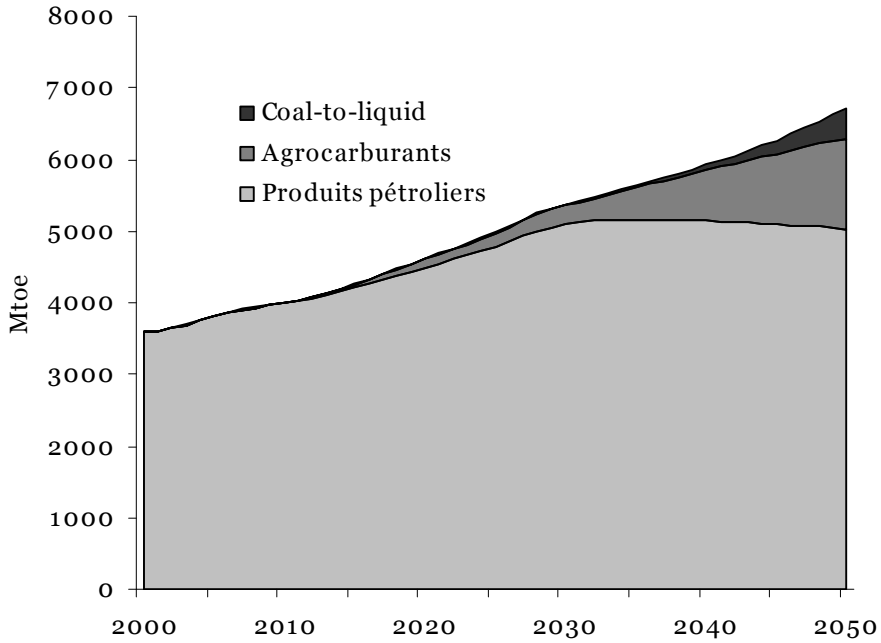


Figure 43 : Evolution de la production de carburants liquides

dans un scénario de référence sans politiques climatiques mondiales, le rôle des forêts comme puits de carbone pourrait être négligé au profit des surfaces cultivées pour les agrocarburants.

3 Conclusion : un risque avéré de dérapage des émissions

Si l'on en croit l'éventail des scénarios publiés dans la littérature, il est tentant de déduire qu'une trajectoire très intensive en émissions n'est qu'une possibilité parmi d'autres. Les résultats de notre démarche tendent à nous laisser penser qu'au contraire, il existe dans l'économie des forces dominantes qui poussent l'économie vers une trajectoire très émettrice : (i) le rattrapage économique, partiel ou total, des pays en développement, (ii) le mimétisme des styles de développement, en ce qui concerne les niveaux d'équipement des ménages et les schémas d'organisation spatiale, (iii) la disponibilité du charbon pour prendre le relais du pétrole au-delà de 2050. Nous avons montré que dans une économie mondiale sans contrainte sur les émissions de GES, ces forces sont susceptibles d'orienter la trajectoire mondiale vers des émissions élevées, proches des scénarios SRES A1f, A1g et A2.

Il existe cependant d'autres dynamiques qui pourraient contrebalancer ces forces motrices de la croissance des émissions, soit parce qu'elles constituent des barrières diverses à la croissance économique, soit qu'elles génèrent des signaux endogènes pouvant induire une bifurcation importante des styles de développement et une rupture avec le « mimétisme » décrit plus haut. Nous pouvons envisager par exemple :

- une défaillance ou une absence des institutions nécessaires au décollage économique puis au rattrapage dans de nombreux pays en développement ;
- la persistance d'une économie largement duale, bloquant l'accès d'une partie significative de la population à des niveaux de productivité élevés, contrairement à nos hypothèses qui supposent la résorption progressive du secteur informel ;
- des frictions prolongées sur les marchés énergétiques, liés à des limitations de ressources plus rapides que prévu, d'origine géopolitique ou physique ;
- des niveaux de pollution et de dégradation des ressources naturelles plus élevés que dans le passé à cause de densités élevées de population ou de saturation du milieu naturel ;
- des dommages climatiques croissants et répétés[92], qui seront d'autant plus élevés que la croissance des émissions sera rapide.

Ces trois derniers éléments sont à la frontière entre scénario « laissez-faire » et scénario de politiques. En les incluant dans un scénario de référence, nous imposerions au modèle des conditions qui justifieraient amplement des réactions adaptatives qui s'apparentent à des politiques de réduction des émissions ou de sécurité énergétique. Il est significatif de remarquer que toutes ces dynamiques limitant la croissance des émissions correspondent à des évolutions peu souhaitables, surtout si le développement humain, la lutte contre la pauvreté et le rattrapage économique des pays en développement reste une priorité mondiale. En fait, nous pensons qu'il existe peu ou pas de dynamiques spontanées[93] dans l'économie qui soient à la fois susceptibles d'induire une moindre croissance des émissions et compatibles avec un développement économique global partagé (par ex. des objectifs du millénaire de la Banque Mondiale).

Même si l'on ne peut juger de la plausibilité des projections de long terme à l'aune des tendances des dix dernières années, il est frappant de constater à quel point nos projections de long terme prolongent l'évolution récente des émissions. La croissance des émissions depuis une décennie rapproche la trajectoire actuelle des scénarios SRES les plus élevés (Raupach et al., 2007), bien que

[92] La décroissance du Honduras due à la succession d'ouragans qui se sont abattus sur le pays fournit un exemple de barrière climatique à la croissance.

[93] Par « décentralisée » nous voulons désigner les forces motrices de l'économie hors politiques publiques de développement durable.

les politiques climatiques aient été explicitement initiées depuis l'adoption du protocole de Kyoto. Derrière cette croissance récente des émissions, nous retrouvons des déterminants similaires à nos projetions de long terme : un ralentissement voire un arrêt de la baisse de l'intensité énergétique, une stagnation voire une légère croissance de l'intensité carbone et une croissance forte pour les pays émergents.

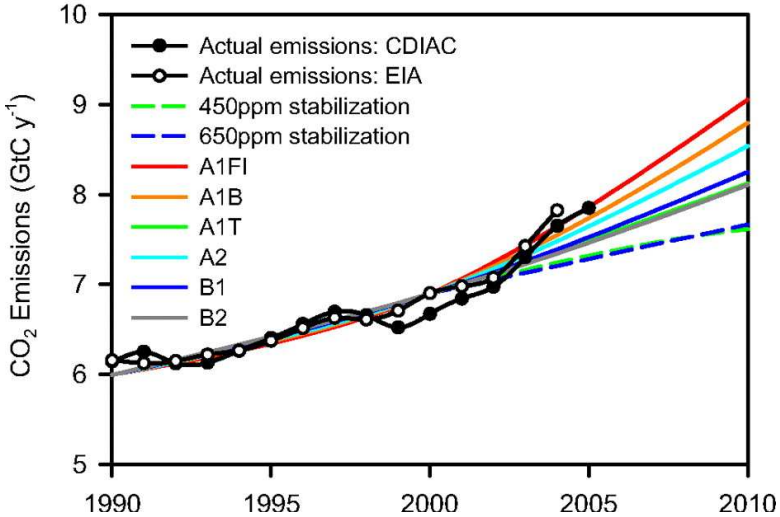


Figure 44 : Croissance récente des émissions de CO_2 et scénarios SRES (Raupach et al., 2007)

La construction de ce scénario de référence a été entreprise sans a priori sur la croissance future du PIB, de la demande d'énergie ou des émissions. Les hypothèses médianes adoptées ont conduit à identifier les déterminants entremêlés d'une probable forte hausse des émissions mondiales : rattrapage économique des PED, mimétisme des styles de développement, disponibilité des ressources fossiles. Même si nous sommes confrontés à des incertitudes permanentes sur l'ampleur de ces mécanismes et à leurs interactions, cette analyse fournit des éléments utiles pour la définition d'une stratégie de couverture (« hedging strategy ») contre les risques climatiques.

Enfin, nous esquissons ici une réponse au malaise suscité par les intervalles d'incertitude très larges fournis dans la littérature (cf. chapitre 1). En effet, avec des hypothèses médianes sur les technologies, le progrès technique et la croissance économique, nous avons produit une trajectoire économique future induisant une multiplication par 2.7 des émissions entre 2000 et 2050, risquant de provoquer un dépassement des seuils de concentrations de GES jugés dangereux par la communauté scientifique (>850 ppm CO_2-eq). Certes, cette expérience ne résout pas la question de l'incertitude sur l'évolution future des émissions, il existe toujours une grande incertitude sur les déterminants macroéconomiques, technologiques et géopolitiques de la trajectoire future. En fait, le premier progrès concerne **la capacité du modèle IMACLIM-R à renforcer la cohérence interne de la simulation d'une trajectoire future**, en n'autorisant pas les combinaisons impossibles de tendances exogènes (par ex. une décarbonisation autonome du secteur électrique malgré des ressources abondantes et peu chères de charbon, ou bien un scénario de croissance très dynamique avec des prix des énergies très élevés aussi). Le second apport de cette simulation est **l'identification des dynamiques sous-jacentes à l'augmentation des émissions** : (i) un rattrapage économique des pays émergents et en développement, qui se traduit par un dynamisme sans précédent des acquisitions d'équipements et des constructions d'infrastructures, (ii) des ressources fossiles qui restent abondantes malgré la déplétion du pétrole conventionnel, (iii) des dynamiques de mobilité fortement croissantes car encore loin de la saturation des besoins. L'identification de ces déterminants permet de préfigurer quelles doivent être les cibles d'une politique climatique efficace pour réduire nos émissions au lieu de les laisser dériver dangereusement.

Références

Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A. et al., 2000, *Special Report on Emissions Scenarios*, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press, Cambridge

Pielke, R. J., Wigley, T., Green, C., 2008, "Dangerous Assumptions", *Nature*, 452, 531-532

Raupach M.R., Marland, G., Ciais, P., Le Quéré, C., Canadell, J.G., Klepper, G. Field, C. B., 2007, "Global and regional drivers of accelerating CO_2 emissions", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, May 22, 2007

Chapitre 6

Vers une réévaluation du coût des politiques de réduction des émissions

‘Yet not even the most rosy-eyed delegate could fail to recognize that stabilizing atmospheric carbon-dioxide concentrations is an enormous undertaking. […]The world is on a development and energy path that will bring with it a surge in carbon-dioxide emissions — a surge that can only end with a transformation of global energy systems. We believe such technological transformation will take many decades to complete, even if we start taking far more aggressive action on energy technology innovation today […].The IPCC plays a risky game in assuming that spontaneous advances in technological innovation will carry most of the burden of achieving future emissions reductions, rather than focusing on creating the conditions for such innovations to occur’ (R. Pielke, T. Wigley et C. Green, *Nature*, 3 Avril 2008)

Si la quasi-totalité des scientifiques et des décideurs politiques reconnaissent la nécessité de limiter les émissions mondiales de gaz à effet de serre pour éviter le changement climatique dangereux que pourrait induire une dérive non contrôlée de ces émissions, on observe par contre une grande confusion dans les débats sur les objectifs quantifiés et les coûts liés à ces objectifs. Concernant les objectifs, l'analyse coûts bénéfices de long terme ne permet pas de dégager une cible globale univoque en termes de trajectoire d'émissions, de plafond de concentration, de forçage radiatif ou d'augmentation de température, notamment à cause des larges incertitudes qui caractérisent l'évolution du cycle du carbone, la sensibilité du climat ou les impact locaux d'un changement climatique global. Seule une stratégie de précaution qui consiste à maintenir le plus longtemps possible le maximum d'options ouvertes apparaît robuste aux incertitudes ou aux désaccords sur le « bon » taux d'actualisation (Ha-Duong et al., 1997), mais ce résultat passe étonnamment inaperçu dans les débats actuels. Du côté de l'évaluation des coûts des efforts de réduction, l'émergence d'un diagnostic éclairant est d'abord freinée par la diversité des concepts et des mesures des coûts de réduction – coûts marginaux, coûts techniques, coûts sectoriels, coûts macroéconomiques. Le dernier rapport du GIEC tente de délivrer le message compact selon lequel il existe de nombreux potentiels de réduction à moins de 100 dollars par tonne de CO_2 (un montant qui impliquerait au premier ordre une augmentation de 40 dollars par baril de pétrole ou de 270 dollars par tonne de charbon) et que le coût macroéconomique d'une trajectoire de stabilisation à 550 ppm CO_2-eq resterait en deçà de 2,5 % de PIB en 2030 et 4% du PIB en 2050. Mais un lecteur éclairé ou un décideur craintif pourront tous deux noter dans le même rapport (i) que ces évaluations restent majoritairement fondées sur des modèles de minimisation des coûts dans un système économique supposé parfait, (ii) que la représentation des politiques climatiques se limite généralement à une valeur du carbone uniforme dans toute l'économie, (iii) que le rapport mentionne des « barrières » à l'adoption des mesures de réduction sans fournir de quantifications de ces barrières. Autrement dit, les évaluations fournies par la littérature scientifique ne sont valables qu'avec un grand nombre d'hypothèses de modélisation très restrictives par rapport au fonctionnement du monde réel *et* à la diversité des instruments à dont peut disposer le régulateur public.

Face à cette confusion sur les politiques de réduction et leurs coûts, ce chapitre s'attache premièrement à clarifier les termes des politiques climatiques – objectifs ultimes et intermédiaires, lieux de réduction des émissions, instruments disponibles pour induire ces réductions. Ensuite, nous nous efforcerons de proposer des pistes d'évaluation des potentiels et des coûts de réduction des émissions dans des conditions de représentation qui peuvent s'écarter des hypothèses restrictives généralement adoptées, grâce au modèle IMACLIM-R. Dans cette seconde partie, nous mettrons en évidence des résultats de coûts de réduction élevés, qui pourraient justifier la prudence voire le pessimisme de nombreux décideurs et négociateurs vis-à-vis des engagements de réduction. Nous rejoignons en quelque sorte, mais avec des arguments différents, la critique de « naïveté » récemment adressée à la communauté scientifique par Pielke et al. (2008). Ce faisant, il s'agit moins de souligner que la réduction des émissions peut être plus difficile ou plus coûteuse que ce qui est affiché dans une large majorité des évaluations, que de démontrer que toute politique ambitieuse doit être conçue pour réduire notre vulnérabilité aux incertitudes réelles qui entourent les mécanismes techniques et économiques qui conditionnent l'évolution future des émissions de GES. Ce pessimisme n'est donc pas définitif, il n'est que la première étape d'une réévaluation des politiques climatiques, qui consiste à « démystifier » le diagnostic des évaluations actuelles de coûts de réduction en éclairant les sources de difficultés éventuelles dans les trajectoires de réduction. Il invite ensuite à l'étude de stratégies robustes aux incertitudes.

1 Les enjeux de la réduction des émissions

1.1 La définition des objectifs de réduction

L'article 2 de la Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique fixe un objectif global pour les politiques d'atténuation du changement climatique:

> 'The ultimate objective of this Convention and any related legal instruments that the Conference of the Parties may adopt is to achieve (…) *stabilization of greenhouse gas concentrations in the atmosphere at a level that would prevent dangerous anthropogenic interference with the climate system*. Such a level should be achieved within a time-frame sufficient to allow ecosystems to adapt naturally to climate change, to ensure that food production is not threatened and to enable economic development to proceed in a sustainable manner.' (UNFCCC, Art. 2)

Cet objectif global ne précise ni le terme « dangereux », ni le niveau de concentration souhaitable, ni le délai ultime de stabilisation. Il existe de nombreuses incertitudes le long de la chaîne de causalité qui relie les émissions aux concentrations, puis au forçage radiatif puis au changement de climat puis enfin aux impacts sur les écosystèmes et les systèmes socio-économiques, si bien que l'objectif est d'autant moins opérationnel qu'il est en aval de cette chaîne.

La situation idéale serait de définit l'objectif optimal grâce à une analyse coûts bénéfices permettant de minimiser la somme des coûts de réduction des émissions, des coûts d'adaptation et des dommages climatiques. Mais la quantification des dommages climatiques ou des coûts de l'adaptation est particulièrement difficile et incertaine (Hallegatte, 2007), si bien que les exercices d'analyse coûts bénéfices restent largement heuristiques et se heurtent à des débats théoriques permanents – par exemple sur le taux d'actualisation – dont les sursauts les plus récents datent des suites de la publication du rapport de Sir Nick Stern (Stern, 2006).

Dès lors, la fixation d'un objectif ultime est soit remis à une date ultime à laquelle l'on espère disposer d'une information scientifique plus complète, soit du ressort d'une décision politique. Les exercices de contrôle optimal avec incertitude sur la cible idéale suggèrent que la stratégie optimale est une stratégie de décision séquentielle (Ha-Duong et al., 1997), conduisant à des efforts supplémentaires de réduction destinés à maintenir toutes les options possibles dans le futur, le temps de parvenir à une information scientifique plus précise par exemple sur la sensibilité du climat ou sur l'existence de seuils d'évolution irréversible et/ou abrupte du climat. Dans la pratique, aujourd'hui, les objectifs annoncés relèvent plus de prises de position politiques que d'arguments de rationalité économique.

En fait, l'hétérogénéité actuelle des décisions politiques en matière d'objectifs ultimes provient à la fois de ces incertitudes scientifiques et de différences d'appréciation des risques encourus :

- Le GIEC se garde bien de trancher quel est le seuil de dangerosité qu'il conviendrait de ne pas dépasser, mais la déclaration du secrétaire général de l'ONU le 24 septembre 2007 a réaffirmé l'urgence de l'action et le devoir de leadership des pays industrialisés.
- La Commission Européenne affiche un objectif global de limite d'augmentation de la température moyenne de +2°C, tout en déclinant désormais des objectifs opérationnels à moyen terme : réduction des émissions de 20% en 2020 et de 50 à 80% en 2050 ;
- La France affiche depuis 2003 – et a inscrit dans sa loi sur l'énergie du 13 juillet 2005 - un objectif de division par 4 de ses émissions de GES en 2050, supposé être cohérent avec une stabilisation globale des concentrations à 450 ppm CO_2 ;

- D'autres pays développés, comme le Royaume-Uni, le Japon et l'Allemagne s'inscrivent aussi dans la perspective d'une société à faible intensité carbone en 2050, à travers divers objectifs comparables au Facteur 4 français.

Le Tableau 25, tiré du quatrième rapport d'évaluation du GIEC, fournit une synthèse éclairante des implications des différentes cibles de stabilisation en amont (réductions nécessaires des émissions, date de fléchissement des émissions mondiales) et en aval (augmentation du forçage radiatif et de la température moyenne). Il est frappant de constater que les scénarios de stabilisation de la catégorie I, qui correspondent au plafond européen de +2°C, exigent un fléchissement des émissions avant 2015. Compte tenu des inerties des équipements, des capacités de production et des infrastructures, un tel fléchissement exige non seulement des efforts rapides des pays développés – comme l'objectif -20% de la Commission Européenne – mais aussi un ralentissement très fort des émissions des PED. L'objectif de stabilisation de la concentration de CO_2 à 450 ppm (environ 550 ppm CO_2eq tous gaz[94]) exige que le fléchissement soit réalisé avant 2030.

Tableau 25 : Implications aval et amont des différentes cibles de stabilisation

Category	Radiative forcing (W/m²)	CO_2 concentration[c)] (ppm)	CO_2-eq concentration[c)] (ppm)	Global mean temperature increase above pre-industrial at equilibrium, using "best estimate" climate sensitivity[b), c)] (°C)	Peaking year for CO_2 emissions[d)]	Change in global CO_2 emissions in 2050 (% of 2000 emissions)[d)]	No. of assessed scenarios
I	2.5-3.0	350-400	445-490	2.0-2.4	2000-2015	-85 to -50	6
II	3.0-3.5	400-440	490-535	2.4-2.8	2000-2020	-60 to -30	18
III	3.5-4.0	440-485	535-590	2.8-3.2	2010-2030	-30 to +5	21
IV	4.0-5.0	485-570	590-710	3.2-4.0	2020-2060	+10 to +60	118
V	5.0-6.0	570-660	710-855	4.0-4.9	2050-2080	+25 to +85	9
VI	6.0-7.5	660-790	855-1130	4.9-6.1	2060-2090	+90 to +140	5
						Total	177

Chaque intervalle de concentration ultime se décline en une enveloppe de trajectoires d'émissions admissibles, comme l'indique la Figure 45. Chacune de ces trajectoires couvre à la fois les émissions d'origine fossile et les émissions liées à la gestion forestière et aux changements d'usage des sols (LULUCF).

[94] Il y a parfois un certain flou dans l'énoncé des objectifs de stabilisation des concentrations : il faut distinguer les cibles qui ne se rapportent qu'à la concentration de CO_2 (75% de l'effet de serre d'origine anthropique) et celles qui concernent les 6 gaz à effet de serre inclus dans le protocole de Kyoto. Pour regrouper les 6 gaz dans un seul objectif de concentration, on utilise l'unité CO_2-équivalent, qui permet de traduire l'effet de serre cumulatif de chaque gaz en équivalent CO_2, en fonction du pouvoir radiatif global à 100 ans.

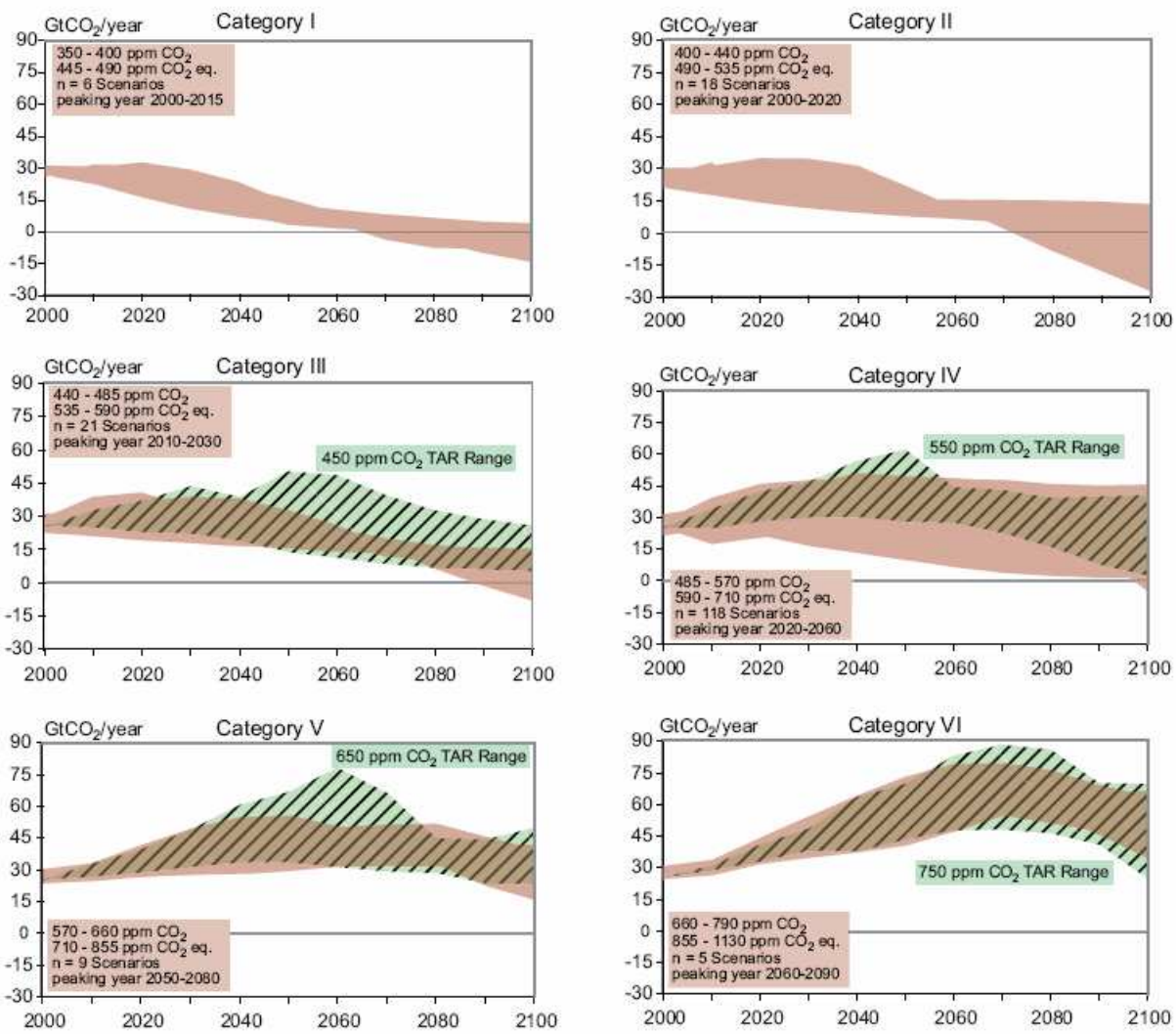


Figure 45 : Trajectoires d'émissions correspondant aux différentes catégories de scénarios de stabilisation des concentrations de GES (GIEC, SPM WGIII, p. 16)[95]

1.2 Les potentiels de réduction des émissions : entre technologies et signaux économiques

Au fur et à mesure que les discussions sur les réductions des émissions évoluent de la stratégie globale à l'action concrète, il est tentant de résumer l'enjeu des politiques de réduction des émissions à un défi purement *technologique*, car on peut trouver à ce défi des réponses rassurantes, car il existe un certain nombre de technologies peu émettrices de GES. En fait, il s'agit d'une part de susciter un *changement technique* vers des techniques existantes moins intenses en énergie ou/et en carbone et d'autre part d'orienter le *progrès technique* vers des technologies peu intensives en énergie et/ou en carbone, soit par l'amélioration de techniques existantes (hausse de la profitabilité, gains d'efficacité), soit par l'innovation dans de nouvelles techniques. De nombreux exercices de prospective et d'articles scientifiques s'attachent ainsi à démontrer que l'adoption de techniques existantes ou susceptibles d'être disponibles d'ici 2030 permettrait de stabiliser les émissions, depuis les scénarios vertueux d'Amory Lovins (1981) jusqu'au dernier rapport du GIEC. Pacala et Socolow (2004) ont par exemple proposé un menu de 15 grandes options technologiques disponibles, dont une sélection pourrait suffire à stabiliser les *émissions* à 7 GtC jusqu'en 2050, afin de permettre ensuite une réduction de ces

[95] Ces enveloppes de trajectoires comprennent aussi bien des trajectoires optimales générées par des modèles intertemporels que des trajectoires non optimales générées par des modèles récursifs.

émissions pour une stabilisation ultime de la *concentration* inférieure à 550 ppm CO_2. En France, l'exercice de prospective mené par Pierre Radanne (MIES, 2003) pour étudier la faisabilité d'une division par 4 des émissions de CO_2 en 2050 procède de la même démarche : il identifie, selon une logique purement comptable, les différents paniers technologiques qui permettent de satisfaire le même niveau de services énergétiques avec 4 fois moins d'émissions de CO_2. La notion de technologie doit ici être comprise au sens large, puisqu'elle inclut des changements de pratiques voire de préférences, comme la division par 2 des passagers-kilomètres parcourus en véhicules particuliers, citée parmi les 15 options de Pacala et Socolow (2004).

On bute ici encore sur la différence d'approche entre l'ingénieur et l'économiste que nous avons mise en évidence au chapitre 2 : l'approche d'ingénieur identifiée ci-dessus a l'avantage de donner des ordres de grandeur sur les possibilités techniques et les volumes de réduction possibles pour les différentes sources d'émissions, mais elle ne fournit qu'un aperçu très partiel de la *faisabilité* des réductions d'émissions dans un contexte économique évolutif. Pour tenter d'apporter une réponse globale qui ne se limite pas à un point de vue purement technologique, le 4ème rapport d'évaluation du GIEC utilise le concept de *potentiel*, sous trois formes imbriquées les unes dans les autres :

- Le **potentiel technique** : il correspond exactement à l'identification des possibilités techniques réalisée dans les exercices de « prospective technologique » à partir des connaissances scientifiques et techniques actuelles. Il ne comporte aucune considération de coût.

- Le **potentiel économique** : il permet de savoir à quel coût les options technologiques identifiées peuvent être implémentées, en donnant la mesure de l'ensemble des réductions dont le coût technique est inférieur à une certaine valeur du carbone. Toute évaluation d'un potentiel économique est donc indissociable de la fourchette de coût considérée. Le sens économique de ce coût va dépendre de la nature du modèle qui a permis de le calculer : un coût « purement technique »[96] dans un modèle d'optimisation énergétique, et un coût « net », incluant les effets de propagation dans l'économie, dans un modèle d'équilibre général.

- Le **potentiel de marché** : il indique le volume de réductions possibles, pour un intervalle de prix du carbone donné, en tenant compte des nombreuses barrières existantes – imperfections de marché, coûts intangibles, asymétrie d'informations, risques inhérents à tout investissement dans un univers incertain, etc.

Le statut des potentiels calculés par les modèles énergétiques ou macro-énergétiques et publiés dans la littérature n'est pas clairement défini. Selon le rapport du GIEC, les modèles sont supposés fournir, en général, des chiffres ayant trait aux potentiels *économiques* de réduction des émissions, c'est-à-dire qu'ils représentent un monde idéal dans lequel les politiques et mesures implémentées parviennent à supprimer les barrières préexistantes à l'adoption de nouvelles technologies. Il est certain que la majorité des modèles ne décrit pas explicitement les coûts intangibles liés à chaque technologie, les situations de concurrence imparfaite, etc. Mais très souvent, le calibrage des modèles, notamment celui des fonctions de part ou des contraintes additionnelles dans les modèles d'optimisation, incorpore de fait, en reproduisant la situation réelle, les imperfections existantes. Dès

[96] En général il s'agit du coût actualisé d'une technologie. Autrement dit, on suppose que la décision d'investissement dans cette technologie sera prise dès que ce coût deviendra inférieur à celui des technologies alternatives, en univers certain, sans considération de risque.

lors, le potentiel calculé par ces modèles est à mi-chemin entre les deux concepts de potentiel économique et de potentiel de marché.

Notons enfin que, quel que soit le concept de potentiel choisi, l'évaluation des potentiels de réduction est toujours dépendante (i) du choix d'une trajectoire de référence (ii) du scénario de politiques dans lequel on le calcule. En effet, un potentiel économique ou un potentiel de marché n'ont de sens que dans un contexte économique et technique bien défini. Les fourchettes d'incertitude telles que celles qui figurent sur la Figure 46 recouvrent à la fois les incertitudes liées à la représentation du changement technique, les incertitudes ayant trait à l'état du monde tout au long au scénario de référence utilisé et les variantes de *policy mix* étudiées dans les modèles.

Qu'en est-il des résultats quantitatifs ? La Figure 46, issue du 4ème rapport d'évaluation du GIEC, fournit quelques enseignements intéressants :

- le secteur des bâtiments, résidentiels et tertiaires confondus, est celui dans lequel les potentiels de réduction sont les plus élevés, et ces potentiels sont majoritairement disponibles à moins de 20 dollars par tonne de CO_2-eq.

- Le secteur des transports ne contient qu'une quantité limitée de potentiels à moins de 100 dollars par tonne de CO_2-eq, alors qu'il est responsable de 20% des émissions mondiales. Ce résultat est partiel, car il ne prend en compte que l'effet d'un prix du carbone sur le panier technologique dans les équipements de transports et sur le partage modal, négligeant les nombreux autres déterminants de la mobilité, comme les infrastructures, les préférences des agents économiques, leur contrainte de budget temps, etc.

- Le secteur global de l'industrie dispose de potentiels importants mais à des niveaux supérieurs à 20 dollars la tonne de CO_2-eq. En fait la recherche d'une plus grande efficacité énergétique a déjà suscité de nombreux changements techniques dans l'industrie depuis deux décennies, réalisant simultanément la majorité des potentiels de réduction à bas coût.

- Les secteurs de l'agriculture et des déchets incluent une part significative de potentiels de réduction à moins de 20 dollars la tonne de CO_2-eq, principalement liés aux gaz à effet de serre autres que le CO_2.

- *Globalement*, cette figure conduit à penser que l'ensemble de potentiels de réduction disponibles dans tous les secteurs devrait permettre, si les nombreuses barrières à l'adoption du potentiel économique de réduction sont levées, de placer l'économie mondiale sur les trajectoires de stabilisation des concentrations de GES les plus basses (catégorie I ci-dessus), pour un prix du carbone situé entre 20 et 50 dollars par tonne de CO_2-eq.

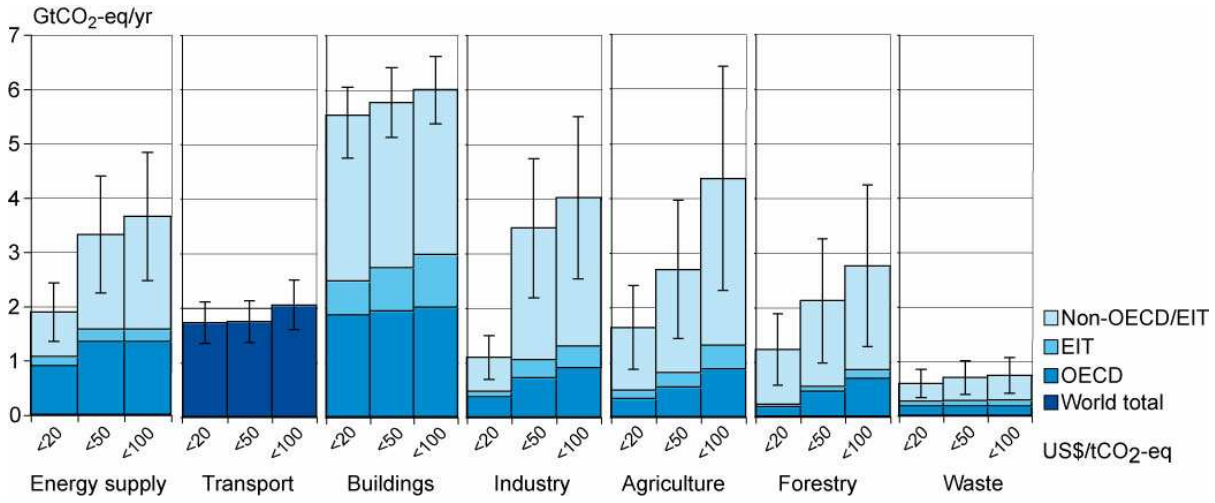


Figure 46 : Potentiel économique de mitigation dans différents secteurs en 2030, toutes trajectoires de référence confondues (GIEC, 2007, SPM WG III)

Si cette conclusion fournit un message optimiste et rassurant sur nos possibilités techniques et économiques de stabiliser les concentrations, il reste à déterminer les instruments de la réalisation décentralisée de ces potentiels, qui doivent faire apparaître des incitation suffisantes à la fois pour rendre ces potentiels rentables pour les agents économiques et pour lever les barrières à l'adoption (information, accès au crédit, hiérarchie des priorités, intérêts autres qu'économiques, etc.).

1.3 Les instruments de politiques de réduction

Le choix d'un ou plusieurs instruments de réduction des émissions de GES a fait l'objet de débats intenses depuis le début des années 90. Les négociations ayant précédé la signature du protocole de Kyoto furent bien sûr le lieu privilégié de ces débats, et l'on assiste, logiquement, à une résurgence de ces débats dans les négociations sur l'après-2012. L'arbitrage central a porté et porte notamment sur le choix d'une régulation par les prix ou par les quantités ou encore sur la détermination du mélange de politiques et mesures qu'il serait opportun et efficace de combiner.

1.3.1 Un incontournable : donner un prix aux émissions de GES

Les émissions de GES étant une externalité négative des activités économiques humaines, le remède préconisé en économie de l'environnement est d'internaliser le coût complet de cette externalité dans les décisions économiques, pour orienter les choix techniques ou les choix de consommation vers des solutions moins émettrices. Le cadre d'analyse standard de l'économie de l'environnement – statique, en équilibre partiel et en univers certain – fournit deux résultats bien connus :

(i) le niveau optimal d'émissions est donné par l'égalisation du coût marginal de réduction et du dommage marginal évité ;

(ii) lorsque la réduction des émissions est confiée à plusieurs agents économiques, la minimisation du coût total de réduction d'une pollution nécessite l'égalisation de tous les coûts marginaux de réduction des émissions.

Le GIEC reprend ces résultats sous une forme très peu normative, tandis que le rapport Stern, entre autres, place le prix du carbone au centre de toute politique de réduction :

> **'Policies that provide a real or implicit price of carbon could create incentives for producers and consumers to significantly invest in low-GHG products, technologies and processes. Such policies could include economic instruments, government funding and regulation** (*high agreement, much evidence*). An effective carbon-price signal could realize significant mitigation potential in all sectors.' (GIEC, WG III, SPM, 2007, p. 19)

> **'Establishing a carbon price, through tax, trading or regulation, is an essential foundation for climate-change policy.** *(…)* Putting an appropriate price on carbon – explicitly through tax or trading, or implicitly through regulation – means that people are faced with the full social cost of their actions. This will lead individuals and businesses to switch away from high-carbon goods and services, and to invest in low-carbon alternatives. Economic efficiency points to the advantages of a common global carbon price: emissions reductions will then take place wherever they are cheapest.' (Stern Review, Executive Summary, 2007, p. 18)

Etant donné que les émissions mondiales de GES relèvent des décisions de consommation et de production de quelques milliards d'agents économiques, il est cependant impossible de garantir l'égalisation des coûts marginaux de réduction à travers des normes et des régulations sectorielles ; le seul moyen est d'instaurer un prix du carbone uniforme pour tous, à travers une taxe unique ou un système de quotas échangeables.

Pour choisir entre ces deux instruments, la littérature économique fournit un certain nombre d'éléments. La contribution la plus connue est celle de Weitzman (1974), dont l'analyse en situation d'incertitude sur les coûts de réduction montre que le choix optimal dépend des pentes relatives du bénéfice marginal et du coût marginal. En appliquant ce raisonnement au problème climatique, caractérisé en effet par une incertitude sur les coûts de réduction, et aussi par une pollution de *stock* qui rend la courbe de dommage marginal très plate, W. Pizer (1997) a souligné la supériorité d'une régulation par les prix. Plus tôt dans les négociations, au début des années 1990, cet argument contribuait déjà à la préférence d'une majorité d'économistes pour une régulation par les prix. Mais pour des raisons politiques, la proposition européenne d'une taxe carbone - énergie à Berlin en 1994 a été abandonnée, sous l'effet combiné de la pression des écologistes pour des objectifs absolus en quantités, du précédent succès du protocole de Montréal sur les émissions de chlorofluorocarbones (CFC), ou encore de l'influence des juristes habitués à une jurisprudence sur des cas de transgression de normes d'émission (Hourcade, 2002).

Il est clair que d'autres considérations que la minimisation des coûts peuvent différencier les deux approches[97] : le coût d'implémentation, les possibilités de recyclage de nouvelles recettes, l'acceptabilité économique et sociale, ou encore les effets sur l'innovation. L'arbitrage entre ces deux instruments dépend *in fine* d'une hiérarchisation des critères de comparaison par les décideurs eux-mêmes. Dans les négociations sur les engagements de réductions sur le changement climatique, les mêmes arguments économiques et politiques reviennent toujours au centre des débats ou dans la littérature consacrée (Stavins, 1997) :

- **Les considérations d'équité et de responsabilité entre les nations** : un argument fréquent en faveur des quotas échangeables est qu'ils permettent la mise en place de transferts importants vers les pays en développement *via* une allocation initiale *juste*, transferts supposés compenser les PED pour le préjudice subi à cause des émissions passées des pays de l'OCDE et permettre aux PED de se développer malgré la contrainte carbone ; cet argument part du principe que, dans le cas d'une taxe universelle, il faudrait

[97] Il faut notre que la comparaison entre taxe et permis est souvent biaisée par le fait qu'on ne considère que les permis distribués gratuitement, alors qu'ils peuvent être rétrocédés aux enchères par les autorités de régulation. Dans ce dernier cas, par exemple, la question du recyclage des recettes se pose autant pour l'instrument prix que l'instrument quantité.

mettre en place *explicitement* des compensations internationales, lesquelles seraient peu acceptables politiquement. Mais comme nous le verrons plus en détail au paragraphe 1.2 du chapitre suivant, la multiplicité des conceptions du *juste* et des règles d'allocation qui en découlent ne permet pas de définir une allocation initiale robuste aux incertitudes sur les coûts finaux : au final c'est une erreur de croire que le repère de l'équité va permettre de ne pas affronter la question des coûts.

- **La souveraineté nationale** : la coordination internationale doit permettre aux états de garder leur entière souveraineté sur les politiques et mesures domestiques. Ce maintien de souveraineté est en principe possible dans le cas de quotas nationaux échangeables entre états. Dans le protocole de Kyoto, chaque pays est laissé libre de mettre en œuvre les politiques et mesures les plus adaptées pour remplir ses objectifs (art 2.1) mais le protocole laisse la possibilité de futurs accords de coordination des politiques et mesures nationales (art 2.4) :

Art 2.1 : « Chacune des Parties visées à l'annexe I, pour s'acquitter de ses engagements chiffrés en matière de limitation et de réduction prévus à l'article 3, de façon à promouvoir le développement durable :
a) Applique et/ou élabore plus avant des politiques et des mesures, en fonction de sa situation nationale […]."

Art 2.4 : « Si elle décide qu'il serait utile de coordonner certaines des politiques et des mesures visées à l'alinéa a) du paragraphe 1 ci-dessus, compte tenu des différentes situations nationales et des effets potentiels, la Conférence des Parties agissant comme réunion des Parties au présent Protocole étudie des modalités propres à organiser la coordination de ces politiques et mesures. »

A l'opposé d'un système de quotas échangeables entre états, une taxe universelle imposée au sein de chaque économie domestique apparaîtrait comme une violation de souveraineté pour un grand nombre de pays, comme a pu le montrer le refus massif, notamment par les Etats-Unis, de la proposition européenne de taxe climat - énergie.

- **La sécurité économique** : la maîtrise des coûts apparaît aussi importante pour les pays développés[98] que pour les pays en voie de développement. Ce critère pèse en faveur des instruments prix, ou pour l'ajout d'un prix-plafond au mécanisme de quotas échangeables, afin de garantir une borne supérieure de coût unitaire. Un autre élément de sécurité économique concerne l'augmentation des risques de délocalisations industrielles pour des raisons de fuite du carbone vers des pays non soumis au prix des quotas ou à une exemption de taxe.

L'arbitrage entre taxe et permis échangeables relève aussi des préférences politiques en vigueur. Il n'est pas nécessaire d'aller jusqu'au raisonnement technique de Weitzmann pour comprendre qu'en situation d'incertitude on ne peut contrôler qu'un seul paramètre, soit le coût marginal, soit l'objectif environnemental, et les deux ne sont pas équivalents au regard des pressions politiques (lobbys industriels, organisations écologistes, opinion publique).

[98] La déclaration de G. Bush père en 2002 au sommet de la Terre à Rio de Janeiro était symptomatique : 'The American way of life is not negotiable'.

1.3.2 Le compromis intéressant des instruments hybrides

Le choix entre instrument prix et instrument quantité place tout régulateur devant une situation très insatisfaisante, dans laquelle il renonce à contrôler soit le coût économique soit l'efficacité environnementale de la politique qu'il met en place : dans les deux cas, l'incertitude à laquelle il s'expose le place dans une situation politique fragile. C'est notamment à cause de l'incertitude sur le coût économique final que de nombreux dirigeants refusent de prendre un engagement quantitatif contraignant. Dès lors, il devient intéressant d'envisager des instruments hybrides, qui proposent un contrôle simultané de l'incertitude sur les quantités et les prix. Ces instruments hybrides sont généralement conçus comme des aménagements d'un système de quotas échangeables.

Une première possibilité d'aménagement consiste à rendre les objectifs quantitatifs *dynamiques*, ou, dit autrement, à fixer des cibles en intensité par rapport à la croissance réelle de l'économie ou des secteurs concernés. Ces objectifs présentent l'attrait de ne plus imposer de contraintes *absolues* sur la croissance ou le développement, répondant ainsi à une revendication forte du G77. Du point de vue de l'implémentation, si ce type d'objectifs est combiné à la flexibilité du marche de quotas, l'allocation initiale des quotas ne peut qu'être approximative et il faut donc réajuster en fin de période ou reporter sur la période suivante la différence de quotas liée à l'écart entre la croissance anticipée et la croissance réelle. Du point de vue de l'efficacité environnementale, il faut pouvoir réviser régulièrement les niveaux d'efforts demandés de manière à réajuster les objectifs dynamiques à la croissance réelle de l'économie ou des secteurs concernés.

Un tel système ne permet cependant qu'une maîtrise très partielle du coût de réduction, maîtrise qui peut être améliorée en fixant des bornes pour le prix des quotas. **Un prix plafond** permettrait ainsi de limiter la hausse du prix du carbone sur le marché des quotas d'émissions en assurant institutionnellement la mise sur marché d'une quantité non-limitée de quotas additionnels à l'allocation initiale à ce prix plafond. Lorsqu'il devient effectif parce que le prix des quotas atteint le niveau du plafond, ce mécanisme induit une « fuite » d'émissions par rapport à l'objectif quantitatif initial. Mais cette fuite peut alors être justifiée (i) par le caractère non-acceptable d'un coût plus élevé, qui menacerait le système de régulation lui-même et pourrait conduire un grand nombre d'agents en situation de non-observance, (ii) par la possibilité de dépassement temporaire d'une trajectoire de stabilisation donnée, sous réserve de réduire plus sévèrement ensuite, si les coûts élevés sont liés à une *transition* technologique, (iii) par un raisonnement de type coûts-bénéfices : si les coûts sont plus élevés, ils ne sont justifiés que pour des dommages plus élevés, et donc il est logique de relâcher la pression sur les émissions. Par ailleurs il est a priori plus facile de rendre acceptable des objectifs quantitatifs ambitieux s'ils sont accompagnés d'un dispositif de prix-plafond, car la crainte de coûts élevés peut pousser les Parties à limiter la contrainte future au maximum. Le réajustement du niveau-plafond est ensuite possible à chaque renégociation. Enfin, lorsque le mécanisme devient effectif, l'achat de permis additionnels au prix plafond dégage des ressources financières qui peuvent être recyclées de diverses manières permettant d'accroître l'efficacité du système : financement de R&D ciblée, fonds d'adaptation, etc. De manière symétrique, la fixation d'un **prix plancher** permet de garantir qu'un effort environnemental est bien réalisé même si l'allocation des quotas a été trop généreuse par rapport à la croissance économique ou les évolutions technologiques en cours. Roberts et Spence (1976) ont montré qu'un système hybride ainsi constitué est toujours plus efficace économiquement que chacune des deux approches « pures ».

Un autre mécanisme proposé par Philibert et Pershing (2001) est plus spécifiquement conçu pour inciter les pays hors du régime contraignant à des efforts de réduction : il s'agit **des objectifs non-contraignants.** Ce mécanisme fonctionnerait comme le mécanisme de développement propre

(MDP) mais à l'échelle globale. Si ces pays émettent plus que leur cible, ils ne sont pas pénalisés pour leur non-observance et aucun achat de quotas supplémentaires ne sera exigé pour corriger leur situation. Mais si les coûts de réduction dans certains PED sont assez faibles par rapport au prix de marché international, ce mécanisme peut représenter une incitation sans risque pour les pays non-contraints à effectuer des réductions domestiques. La fixation des objectifs peut cependant être sujette à controverse, à cause du risque de distribution d'importantes quantités d'air chaud, notamment si la croissance effective se révèle plus faible que prévue. Si l'objectif est trop bas, l'incitation à réduire diminue, parce qu'avant de pouvoir vendre des quotas, le pays concerné devra financer sur ses propres ressources les réductions nécessaires pour atteindre l'objectif. Il faudra alors que les gains dégagés par les réductions suivantes soient suffisants pour compenser les premières réductions. Ces difficultés peuvent éventuellement être contournées en combinant objectifs dynamiques et objectifs non-contraignants.

Bien sûr, l'encadrement des coûts des politiques climatiques nécessite toujours de s'autoriser une marge de manoeuvre transitoire sur l'objectif environnemental. Mais l'absence de telles soupapes de sécurité pourrait conduire à l'illusion d'une intégrité environnementale alors qu'elle comporte le risque de l'éclatement rapide des accords à cause d'un coût réel trop élevé.

1.4 Coûts de réduction et contenu des politiques : un consensus formel autour du prix unique ?

L'ampleur des coûts de réduction des émissions reste toujours un critère de décision essentiel pour la mise en œuvre de politiques climatiques. Mais les incertitudes qui caractérisent les évaluations *ex ante* de ces coûts sont de nature à empêcher des anticipations stables du côté des décideurs, pour au moins trois raisons :

- Les évaluations des coûts marginaux et des coûts totaux au niveau mondial sont très incertaines. En fait, si l'on s'en tient à la synthèse réalisée par le GIEC dans son dernier rapport d'évaluation[99] et à un objectif de 550 ppm CO_2-eq, il apparaît que le coût marginal en 2030 devrait se situer entre 5 et 80 dollar par tonne de CO_2, soit un écart de 1 à 16. De même le coût macroéconomique global à la même date est compris entre 0.2 et 2.5% du PIB mondial (c'est-à-dire moins de 0.1% de perte de croissance annualisée), soit un écart de 1 à 12.

- On dispose de peu d'informations sur la répartition régionale de cette incertitude sur les coûts totaux, car celle-ci va dépendre fortement (i) du choix des politiques et mesures d'accompagnement internes à chaque pays (réforme fiscale, compensations diverses, infrastructures, etc.), (ii) du système de compensations internationales entre régions, par exemple à travers des échanges de quotas[100]. Le 4ème rapport du GIEC fournit des intervalles de coûts à l'échelle mondiale, mais reste extrêmement concis sur les évaluations des coûts régionaux. Nous avons trouvé une information quantitative uniquement dans le rapport complet, avec la Figure 47[101], qui donne une information relative au prix du CO_2 correspondant à différents niveaux de réductions régionales. Le

[99] Cette synthèse reprend les résultats des travaux de comparaison de modèles explicitement orientés vers l'évaluation ex ante des coûts des politiques de réduction comme EMF 16 (Weyant et al., 1999), EMF 21 (de la Chesnaye et Weyant, 2006) et IMCP (Edenhofer et al., 2006).
[100] Nous discutons des règles d'allocation de quotas et des transferts internationaux que qu'elles impliquent dans le chapitre suivant, §1.2
[101] Figure 3.31 dans le rapport complet du groupe III, p.217

Résumé pour les Décideurs du rapport de Synthèse fait simplement état du risque de pertes significatives pour les régions exportatrices d'énergie fossile[102]. Cette prudence est compréhensible dans le rapport du GIEC à cause du caractère politiquement sensible des incertitudes qui pèsent autour des évaluations de coûts régionales. Mais la littérature ne fournit en général guère plus d'information sur les risques macroéconomiques d'une politique climatique contraignante dans les PED. Les engagements pris dans le cadre du protocole de Kyoto avaient donné lieu à une série d'évaluations, mais cela ne concernait que les pays de l'Annexe I, les autres bénéficiant à la marge des effets de fuite du carbone. Certaines études se sont penchées sur le régime post-Kyoto, en fournissant parfois une évaluation numérique des coûts associés à ces régimes (Jacoby et al., 1999, Van Vuuren et al., 2003, Böhringer et Löschel, 2005). Ces études fournissent un diagnostic relativement homogène : les coûts d'une stabilisation à 550 ppm CO_2-eq en 2050 restent modérés, inférieurs à 5% du PIB ou de la consommation pour la majorité des régions, sauf les régions exportatrices de pétrole qui subissent l'effet de la diminution de leurs exportations sous un régime climatique global. Ces articles ne fournissent en général aucune information préciser sur le chronogramme des coûts, ni d'analyse spécifique des coûts de transition.

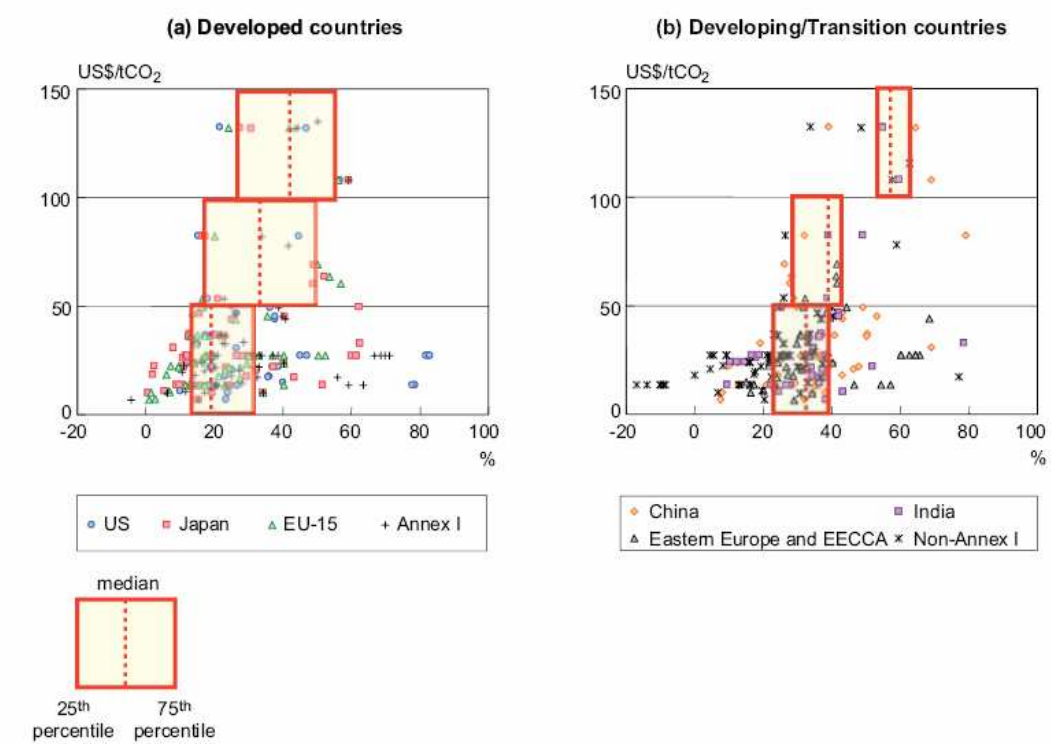


Figure 47 : Relation entre le prix du carbone et les réductions d'émissions de CO_2 par rapport au scénario de référence en 2050, tirée d'une sélection de littérature publiée depuis le 3ème rapport d'évaluation.

- Il est clair et explicite que les modèles utilisés pour fournir ces évaluations ne représentent qu'une partie des mécanismes du monde réel, et échouent en particulier à représenter les barrières institutionnelles et comportementales ou les autres sources de non optimalité (GIEC, 2007, WG III, SPM, box SPM-3).

[102] Mention qui a été obtenue seulement après un long débat lors de l'examen du SPM à Valencia en Novembre 2007, sur l'intervention insistante de certains pays exportateurs de pétrole et malgré l'avis contraire de certains délégués qui ne voyaient pas de raison de ne mentionner qu'un seul résultat régional.

- On comprend aisément qu'une telle situation ait pu conduire à une défiance quasi généralisée vis-à-vis des évaluations très incomplètes des coûts des réductions d'émissions. La situation est en quelque sorte aggravée par le fait que, en guise de réponse principale, l'économie réaffirme la recommandation simple d'une taxe uniforme du carbone pour s'assurer la minimisation des coûts totaux. Loin d'être cantonné à un résultat de manuel d'économie, cette recommandation constitue aujourd'hui un puissant attracteur intellectuel dans le monde économique *réel* et les négociations internationales (Hourcade, 2002). Pourtant, pour combler le fossé qui sépare la prise de décision réelle et la forme des évaluations dont nous faisons état ci-dessus, il est nécessaire d'approfondir l'évaluation des opportunités et des contraintes que représente une politique climatique généralisée ou une transition globale vers une société peu émettrice de GES, en se fixant moins sur le bilan global en termes de pertes de PIB ou de prix du carbone à une date donnée que sur les indicateurs des tensions pouvant survenir le long d'une trajectoire de décarbonisation. Pour cela, il faudrait par exemple (i) disposer de la chronique temporelle des coûts, qui permet de distinguer les périodes de transition plus coûteuses, puis d'améliorer le profil temporel de la contrainte ou d'adopter des mesures compensatoires ; (ii) examiner la distribution des coûts entre les régions et à l'intérieur des régions, afin de considérer les possibles frictions à l'échelle internationale ou infranationale, et d'étudier les mesures compensatoires pouvant permettre d'accompagner les transitions en diminuant ces frictions ; (iii) déterminer le ou les mécanismes principaux dans l'apparition des coûts de réduction (budget des ménages, fardeau pour certains secteurs, faibles élasticités, contraintes particulières, termes de l'échange, etc.) pour mieux adapter les politiques et mesures à ces mécanismes.

Nous tenterons, dans les simulations présentées dans ce chapitre, réalisées avec le modèle IMACLIM-R, de répondre à ces préconisations, sans toutefois être en mesure d'examiner les questions de distribution infranationale, compte tenu du niveau d'agrégation du modèle mondial.

2 Coûts et efficacité de scénarios de stabilisation avec prix unique du carbone

La seconde partie de ce chapitre est consacrée à l'étude de deux scénarios de réduction des émissions mondiales, construits à partir des hypothèses du scénario de référence présenté au chapitre précédent, auxquelles nous avons ajouté une contrainte d'enveloppe des émissions mondiales permettant une stabilisation à 450 ou 550 ppm CO_2-équivalent et, pour respecter cette contrainte, une régulation homogène fondée sur une valeur mondiale uniforme du CO_2. Ici, il s'agit moins de fournir une n-ième évaluation de coût d'un objectif de stabilisation donné que d'explorer les pistes dégagées ci-dessus ; en particulier, l'ambition de l'exercice est double :

- Laisser entrevoir les nouvelles possibilités méthodologiques ouvertes par les innovations de l'architecture IMACLIM-R pour l'évaluation des politiques climatiques à moyen et long terme ;

- Dégager des faits stylisés intéressants sur les modalités de bifurcation vers des trajectoires peu intenses en carbone : flexibilités et barrières, répartition et chronologie des coûts, interactions entre politiques climatiques et marché de l'énergie

2.1 Hypothèses de politiques climatiques

2.1.1 Des enveloppes d'émissions de CO_2 d'origine fossile compatibles avec une stabilisation tous gaz à 450 et 550 ppm CO_2-éq

Nous étudions dans ce chapitre deux scénarios dans lesquels l'économie mondiale se place, à l'horizon 2050, sur des trajectoires de stabilisation des concentrations, en mettant en œuvre les réductions d'émissions nécessaires.

Le premier scénario correspond à un objectif de stabilisation des concentrations de GES à 450 ppm CO_2-équivalent, objectif qui pourrait être en ligne avec l'objectif européen de ne pas dépasser 2°C d'augmentation de température par rapport au niveau préindustriel. Ce niveau de stabilisation exige que les émissions mondiales commencent à décroître entre 2010 et 2020 (cf. Tableau 25), ce qui suppose un engagement massif de la part des pays développés comme de la part des pays émergents.

Le second scénario permet un relâchement temporaire de cette contrainte d'engagement rapide et massif, en visant un niveau de stabilisation ultime plus élevé, à 550 ppm CO_2-équivalent, ce qui permet de repousser l'échéance du pic d'émissions à 2030 et de ralentir le rythme des réductions requises pour permettre la stabilisation, qui sera reculée en 2150 pour 550 ppm au lieu de 2100 pour 450 ppm.

Ces deux contraintes sont formulées en termes d'émissions de GES en CO_2-équivalent. Comme le modèle IMACLIM-R ne permet que l'étude des émissions de CO_2 d'origine fossile, nous supposons que tous les gaz font l'objet des mêmes pourcentages de réductions que les émissions de CO_2 LULUCF ou que les émissions d'autres gaz. Cette hypothèse nous permet de reporter exactement le profil d'émissions tous gaz dont nous disposons sur les émissions de CO_2 d'origine fossile. Ce faisant, nous négligeons certaines flexibilités liées aux possibles transferts d'efforts avec les réductions d'autres gaz ou les émissions LULUCF[103]. Mais l'esprit des trajectoires de stabilisation reste inchangé : pour stabiliser à 450 ppm CO_2-équivalent il faut de diviser les émissions par 2 en 2050, tandis que pour stabiliser à 550 ppm CO_2-équivalent il serait nécessaire d'atteindre cette division par 2 en 2100 et il « suffirait » de ramener les émissions de 2050 au niveau de 2000, en faisant plafonner les émissions entre 2010 et 2030.

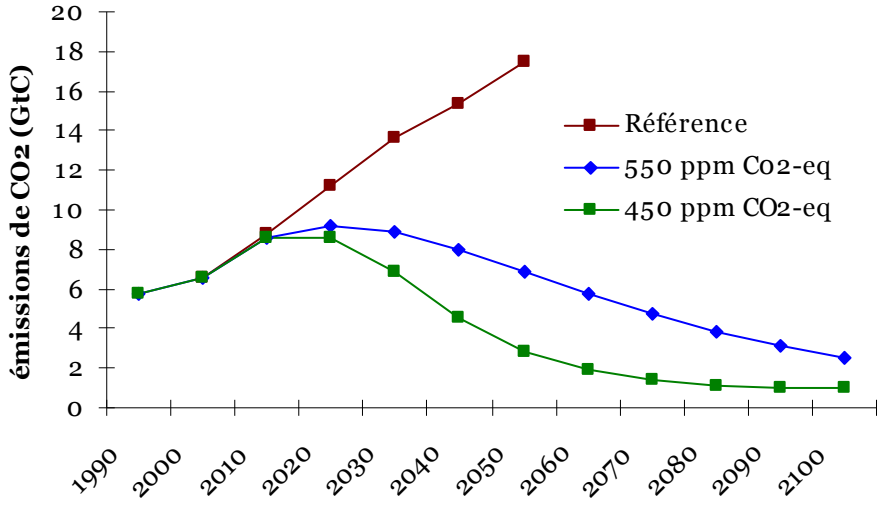


Figure 48 : Trajectoire de référence et enveloppe d'émissions pour une stabilisation à 450 ppm CO_2

[103] En fait dans les simulations multigaz (de la Chesnaye et Weyant, 2006), les autres gaz permettent de baisser le coût de réduction à court terme, mais les potentiels restent limités à long terme.

Tableau 26 : Points de passage tous les dix ans pour une stabilisation à 450 et 550 ppm CO2-eq

	1990	2000	2010	2020	2030	2040	2050
450 ppm CO_2-eq (indice)	100	114	**150**	**150**	**120**	**80**	**50**
550 ppm CO_2-eq (indice)	100	114	**150**	**160**	**155**	**140**	**120**

2.1.2 Une coordination mondiale fondée sur un prix du carbone universel

Chaque scénario de réduction est obtenu en supposant l'instauration d'un prix unique du carbone sur toutes les émissions de CO_2 d'origine fossile dans le monde. Le profil de cette valeur du carbone est obtenu par tâtonnement pour assurer des points de passage tous les dix ans correspondant à l'enveloppe d'émissions ci-dessus (Tableau 26). Nous observons ici la recommandation théorique d'une valeur unique du carbone, en supposant une participation simultanée des pays développés et des pays en développement, qui doivent accepter d'être soumis conjointement à un unique profil de prix du carbone. Ce faisant, nous gardons en mémoire qu'un tel scénario de politiques coordonnées supposerait un engagement unanime des Parties à l'UNFCCC, et des garanties, pour les pays émergents et les pays en développement, que l'impact macroéconomique d'une telle coordination restera faible, au nom du droit au développement et des responsabilités différenciées, inscrites dans le texte fondateur de la Convention. Jusque là, les négociations ont toujours achoppées sur ce problème, étant donné que les propositions de régimes d'engagement contraignants pour les pays en développement ne peuvent être assortis de garantie d'innocuité macroéconomique. Le Mécanisme de Développement Propre constitue une première tentative de réponse à cet obstacle, conçu effectivement comme une implication « sans risque » des PED mais les réductions entreprises grâce à ce mécanisme resteront largement insuffisantes par rapport à l'ampleur des efforts nécessaires.

Pour rendre cette hypothèse explicite dans le modèle IMACLIM-R, il faut préciser les modalités d'implémentation de cette valeur du carbone :

- Nous supposons que la valeur du carbone est instaurée via une taxe sur le contenu carbone ajoutée aux prix des ressources fossiles (charbon, pétrole raffiné, gaz) et prélevée dans la région dans laquelle elles sont consommées.

- Nous supposons que le revenu de la taxe est recyclé en priorité en se substituant exactement aux taxes préexistantes sur la masse salariale à budget de l'état constant, puis sous forme de reversement global aux ménages pour les revenus de la taxe supplémentaires, si la possibilité de diminuer les taxes sur les salaires est épuisée.

- Nous n'envisageons ici aucun transfert international en parallèle des taxes coordonnées dans chaque région[104].

- La visibilité et la crédibilité du profil du prix du carbone sont supposées parfaites jusqu'en 2050 : autrement dit, lors de la formation de leurs anticipations, les agents économiques connaissent parfaitement le profil de ce prix exogène sur toute la durée de la trajectoire,

[104] Pour faire le lien avec un système de quotas échangeables, il est possible d'examiner l'écart entre les réductions effectives induites par le prix unique du carbone et une des règles d'allocation possibles sur le marché global de quotas, puis d forcer le modèle à intégrer les flux de capitaux qui en découlent.

alors que les autres prix des biens, endogènes au modèle, ne sont, eux, qu'imparfaitement anticipés.

- L'instauration du prix du carbone provoque dans le modèle quatre types de changements par rapport au scénario de référence : des gains d'efficacité énergétique supérieurs, des substitutions de sources d'énergie, du progrès technique induit dans les technologies non carbonées et enfin la substitution vers des biens et services moins affectés par le prix du carbone. Ce n'est pas la valeur exogène de la taxe qui prescrit directement ces changements, mais bien les variations de prix relatifs résultant de la propagation du prix du carbone dans toute l'économie.

2.2 Bifurcation vers un système énergétique décarbonisé : potentiels et obstacles

2.2.1 Profil de prix du carbone : un révélateur des contraintes dynamiques

Le prix du carbone nécessaire pour respecter le profil d'émissions exogène propre à chaque scénario de stabilisation nous fournit un indicateur simple de l'intensité de la contrainte. La valeur du prix du carbone en chaque point du temps ne dépend pas seulement de la contrainte de volume d'émissions à cette date, mais du profil complet de l'enveloppe, à cause de l'inertie des investissements et des technologies.

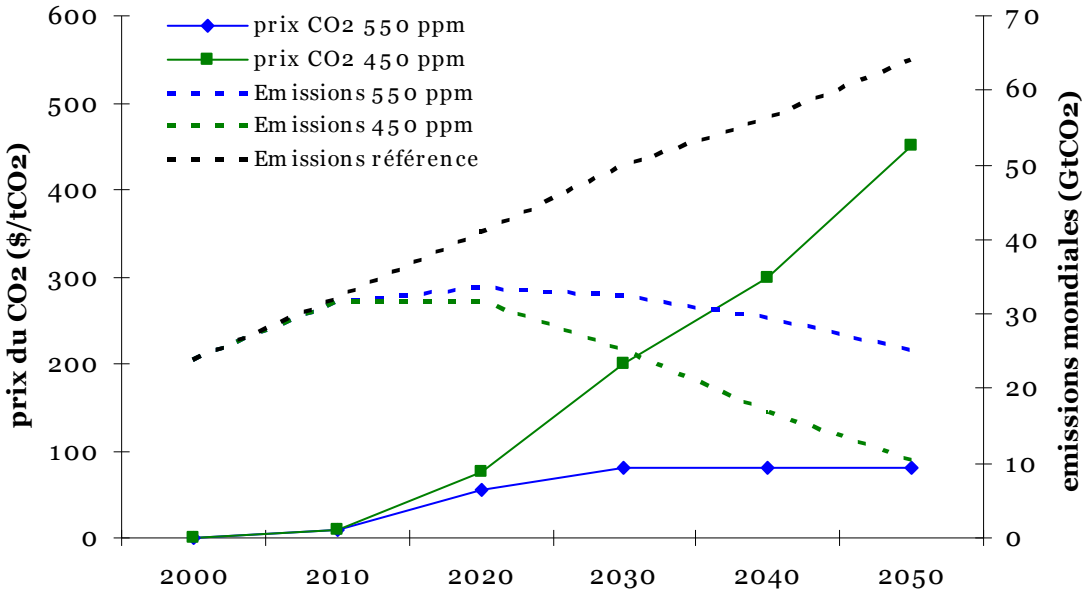


Figure 49 : Profils du prix du CO_2 et trajectoires d'émissions

Dans notre scénario de stabilisation à 550 ppm CO_2-equivalent, le prix du carbone croît de 10$ par tonne de CO_2 en 2010 à 80 $ par tonne de CO_2 en 2030, puis il suffit de le stabiliser pendant 20 ans à 80 $ par tonne de CO_2 pour poursuivre la diminution des émissions mondiales à un rythme de 1,3% par an (Figure 48). Ce profil constitué d'une montée rapide du prix d'ici 2030 et d'un plateau lors des 20 années suivantes s'explique par la conjonction de deux mécanismes simultanés (Figure 50) :

- L'interaction entre des anticipations imparfaites et limitées dans le temps et l'inertie des équipements et des technologies encapsulées dans les équipements : l'affichage d'un prix croissant rapidement à t+10 ou t+20 est nécessaire pour induire dès le début de la période une pénétration importante des technologies moins carbonées et plus efficaces dans les nouveaux équipements[105] ;

- Le progrès technique induit, qui permet de limiter la hausse (voire d'entamer une baisse) de la taxe après quelques décennies : les technologies peu carbonées, qui étaient marginales parce que peu rentables en début de période, deviennent progressivement plus rentables, d'abord à cause du prix élevé du carbone, puis grâce aux effets d'apprentissage induits par les investissements cumulés. Cet effet renvoie à la courbe en 'S' qui caractérise la pénétration les technologies innovantes (Figure 51) selon trois phases : une phase de recherche et développement pour mettre au point la technologie, une phase de pénétration progressive avec soutien fort pour assurer la rentabilité des innovations, puis une phase de gain autonome de parts de marché grâce à l'apprentissage accumulé.

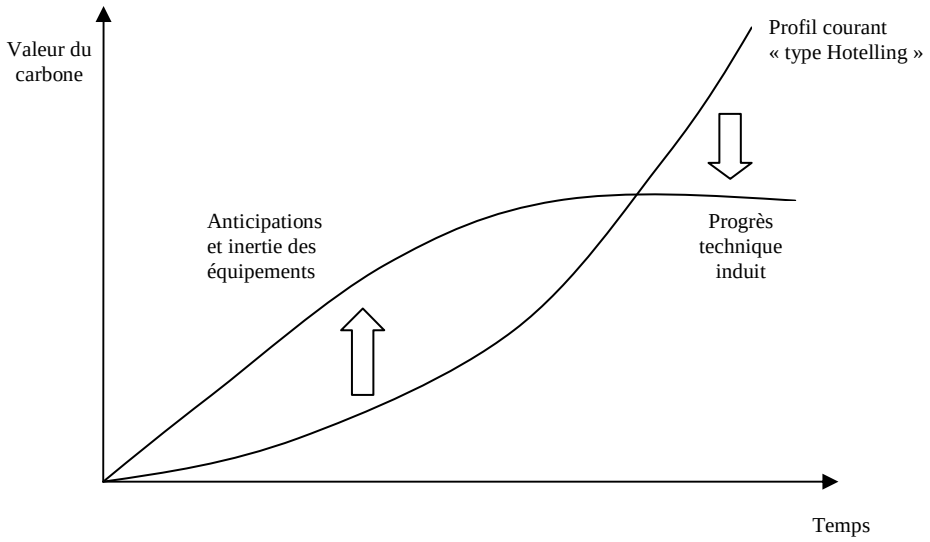


Figure 50 : Effets des hypothèses du modèle IMACLIM-R sur le profil du carbone

Un prix de 80 dollars par tonne à l'horizon 2050 se situe dans la large fourchette d'évaluation reprise dans le 4ème rapport d'évaluation du GIEC, qui va de 15 à 130 $ par tonne de CO_2-équivalent (SPM, §23, p.19). Par contre, le même prix en 2030 situe notre simulation sur la borne supérieure de l'intervalle fourni par le même rapport pour 2030, qui va de 20 à 80 $ par tonne de CO_2 (et de 5 à 65 dans les modèles avec progrès technique induit). La combinaison de l'inertie des équipements et d'une anticipation parfaite du prix du CO_2 limitée à un horizon de 10 ou 20 ans explique en grande partie pourquoi, dans IMACLIM-R, le prix du CO_2 croît rapidement à l'horizon 2030.

[105] Le modèle n'inclut pas aujourd'hui les possibilités de révision des équipements (*retrofit*) et de mise au rebut anticipée du capital (*early scrapping*), deux leviers supplémentaires qui permettraient d'aller plus vite que le rythme de renouvellement des équipements, avec un surcoût non négligeable.

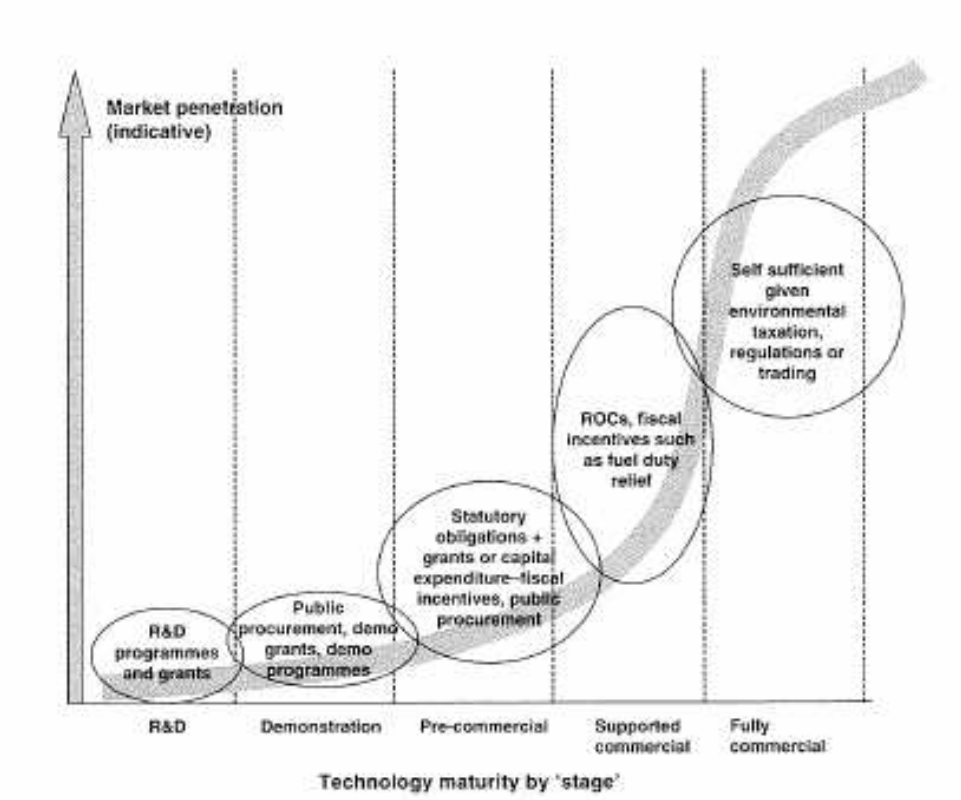


Figure 51 : Courbe de pénétration en 'S' des technologies innovantes (Foxon et al., 2005)

Le respect de la trajectoire d'émissions compatible avec une stabilisation à 450 ppm CO_2 exige un profil du carbone très différent dès 2020 : d'une part, le point de passage en 2020 est 35% plus élevé, à 75 dollar par tonne de CO_2, d'autre part le prix du CO_2 croît ensuite linéairement, avec un incrément annuel de 12,5 dollars par tonne de CO_2, pour atteindre 450 dollars par tonne de CO_2.

Si nous revenons aux trajectoires d'émissions exogènes, nous pouvons constater que les trajectoires de stabilisation à 450 et 550 ppm CO_2-équivalent se distinguent non seulement par le point de passage en 2050 (10 GtCO2 et 25 $GtCO_2$) mais aussi par la sévérité du « virage » qu'il faut opérer entre 2020 et 2030 (plafonnement des émissions pour la trajectoire 550 ppm vs. réduction de -20% en 10 ans pour la trajectoire 450 ppm). C'est en fait pour réussir le « virage » plus serré de la trajectoire à 450 ppm qu'il est nécessaire d'afficher un prix du CO_2 beaucoup plus élevé dès 2030. Le prix doit ensuite continuer à croître fortement à cause de la rigueur de la trajectoire d'émissions, qui oblige, comme nous allons le détailler dans notre analyse sectorielle ci-dessous, à infléchir les émissions du secteur transport, que l'on sait beaucoup moins élastiques au prix du CO_2. Dans ce cas, l'effet du progrès technique induit est présent, comme dans le scénario 550 ppm, mais il est masqué par la forte croissance du prix du CO_2 nécessaire pour réaliser les réductions rigoureuses requises.

Nous avons choisi ici de nous concentrer sur la première moitié du siècle pour étudier les coûts de transition liés aux politiques climatiques. Cela ne constitue néanmoins qu'une partie de l'histoire : dans tous les scénarios de stabilisation, il faut ultimement ramener les émissions de GES à un niveau absorbable par la biosphère, de l'ordre de 3 GtC[106], soit d'ici 2100 soit plus tard pour les niveaux de stabilisation supérieurs à 550 ppm CO_2-équivalent. Lorsque des émissions trop élevées conduisent à un dépassement du seuil de concentration souhaitée, il faudrait même envisager un stockage net des

[106] Ce niveau dépend en fait de la concentration ultime des GES dans l'atmosphère et l'océan, puisque la capacité d'absorption des puits océaniques et terrestres dépendra in fine du climat futur et de la chimie de l'atmosphère et des océans sous des concentrations de GES différentes de celles que nous connaissons.

émissions (émissions négatives), par exemple avec des centrales à biomasse équipées de capture et séquestration du carbone. AAu-delà de 2050, d'autres obstacles peuvent survenir[107] :

- pour le scénario 550 ppm, la baisse des émissions requise à la fin du siècle exige aussi de réduire les émissions des transports et donc de faire grimper le prix du carbone dans des proportions similaires au profil que nous observons pour le scénario 450 ppm. Le plateau de quelques décennies ne pourra logiquement être maintenu beaucoup plus longtemps, sauf si une rupture technologique majeure dans le domaine des carburants ou de la motorisation survient sans forte hausse du prix du carbone.

- Pour le scénario 450 ppm, l'existence et l'adoption des technologies nécessaires pour réduire les émissions si drastiquement avant 2100 est en partie hypothétique, car elle reste dépendante de certaines ruptures technologiques aujourd'hui difficiles à évaluer sur les carburants et les énergies alternatives. Le 4ème rapport d'évaluation du GIEC précise que très peu de modèles – 6 scénarios publiés seulement – permettent d'envisager, en l'état actuel des recherches, des trajectoires de stabilisation aussi rigoureuses. Même si cela n'a jamais été publié, les échanges informels entre modélisateurs montrent que dans de nombreuses simulations, les émissions repartent à la hausse dans la seconde moitié du siècle, en particulier à cause d'une difficile maîtrise des émissions liées aux transports. Le respect d'une trajectoire aussi rigoureuse jusqu'à 2050 doit donc être considérée en partie comme un « pari » sur la possibilité ultérieure de ruptures technologiques suffisantes pour achever la stabilisation ultime. Paradoxalement, c'est un pari plausible si des réductions importantes sont entreprises rapidement, du fait que les efforts d'innovation entrepris pendant 30 ou 40 ans selon différentes pistes peu intenses en carbone pourront aboutir à des solutions impossibles à décrire aujourd'hui.

2.2.2 Réductions d'émissions par secteurs : un aperçu des flexibilités et des blocages

Comme nous l'avons vu avec la Figure 46 tirée du dernier rapport d'évaluation GIEC (§1.2), les potentiels de réduction des émissions dans les différents secteurs de l'économie présentent une large hétérogénéité. Nos scénarios produisent eux aussi des niveaux d'effort très différents selon les secteurs considérés, lorsque l'on soumet l'économie mondiale à un prix unique du CO_2. Le Tableau 27 et la Figure 53 fournissent un aperçu mondial des contributions sectorielles dans le cumul des réductions réalisées entre 2010 et 2050 par rapport au scénario de référence, dans le cas des deux scénarios et aussi pour les réductions additionnelles du scénario 450 ppm par rapport au scénario 550 ppm[108]. Il importe de conserver à l'esprit que ces chiffres dépendent largement du contenu structurel et technique du scénario de référence, par rapport auquel ces réductions sont réalisées. L'examen des réductions sectorielles générées au niveau mondial permet de dégager les points suivants :

- Les secteurs contribuant le plus largement aux réductions sont l'industrie (39%), l'énergie consommée dans les bâtiments (25%) – résidentiel et tertiaire – et la production d'énergie (17%). Par rapport aux intervalles donnés par le GIEC, ces réductions font ressortir un

[107] Pour une étude de trajectoires à 2100, on pourra se référer à la thèse de doctorat d'Olivier Sassi (2008).
[108] Ces chiffres sont directement comparables avec les données du GIEC car nous avons comptabilisé les émissions au niveau des usages finaux – autrement dit les émissions liées à la production d'électricité sont ventilées dans les secteurs au prorata de leur consommation d'électricité – comme dans le graphique du GIEC (Note 1, SPM III, p.11).

certain optimisme pour les réductions de l'industrie et une fourchette basse des potentiels de réductions dans les bâtiments. Ces résultats sont dépendants de nos hypothèses d'asymptotes technologiques. Ils s'expliquent aussi par le contenu de notre scénario de référence, en particulier par la croissance très industrielle dans les pays émergents, avec une industrie très intense en carbone.

- Dans le résidentiel, la consommation unitaire par m^2 diminue de 50% en moyenne dans les pays de l'OCDE, ce qui est plutôt faible par rapport à la taille des potentiels habituellement cités, mais il faut rappeler qu'une partie significative des gains d'efficacité possibles est déjà effectuée dans le scénario de référence. En Chine et en Inde, la consommation unitaire par m^2 en 2050 est inférieure respectivement de 35% et 20% par rapport au scénario de référence, malgré de fortes dynamiques d'équipements dans ces pays émergents. La quasi-totalité des efforts sont réalisés dans le scénario 550 ppm, donc à moins de 80 dollars par tonne de CO_2 ; le surcroît de taxe dans le scénario 450 ppm induit moins de 2% d'efficacité supplémentaire. Cela signifie que l'on bute sur la contrainte de rythme de renouvellement des stocks existants, auxquels il faut ajouter les équipements construits et mis en place dans les premières années de la période, jusqu'à ce que le prix du carbone soit suffisamment élevé pour réorienter les choix techniques.

Tableau 27 : Contribution des différents secteurs aux réductions d'émissions cumulées

	Réductions totales 550 ppm	**Réductions additionnelles 450 ppm**	**Réductions totales 450 ppm**
Réductions cumulées 2010-2050	731 $GtCO_2$	314 $GtCO_2$	1045 $GtCO_2$
Ressources fossiles	**10%**	4%	8%
Electricité	**7%**	2%	5%
Agriculture & Composite	**21%**	17%	20%
Industrie et BTP	**39%**	42%	40%
Transport aérien	**0%**	2%	1%
Transport terrestre	**4%**	5%	4%
Transport maritime	**1%**	2%	1%
Véhicules particuliers	**2%**	21%	8%
Résidentiel	**15%**	5%	12%

- Les émissions liées à la production d'électricité en 2050 sont réduites de 93% dans le scénario 550 ppm et de 97% dans le scénario 450 ppm. Cette réduction quasi-totale des émissions est d'abord permise par des efforts considérables d'efficacité énergétique du côté de la demande finale, efforts qui permettent une diminution de la production totale de 20 % dans le scénario 550 ppm malgré les nombreuses substitutions vers l'électricité dans les usages finaux[109]. Le secteur électrique connaît simultanément une réorientation complète des choix d'investissements de production, qui s'effectue en deux phases : de 2010 à 2030, nous observons une orientation majoritaire vers le gaz, le nucléaire et les renouvelables, qui

[109] Dans le scénario 450 ppm, cette réduction n'est que de 15% par rapport à la référence à cause de l'effet dominant des substitutions additionnelles vers l'électricité dans les usages finaux.

croissent au moins au même rythme que dans le scénario de référence malgré une demande globale moindre, tandis que la part du charbon diminue quasiment au rythme du vieillissement des centrales à charbon ; de 2030 à 2050, le nucléaire et les renouvelables continuent d'assurer une part croissante de la production, tandis que le charbon revient en force pour remplacer le gaz, grâce au développement massif de centrales équipées de capture et séquestration du CO_2.

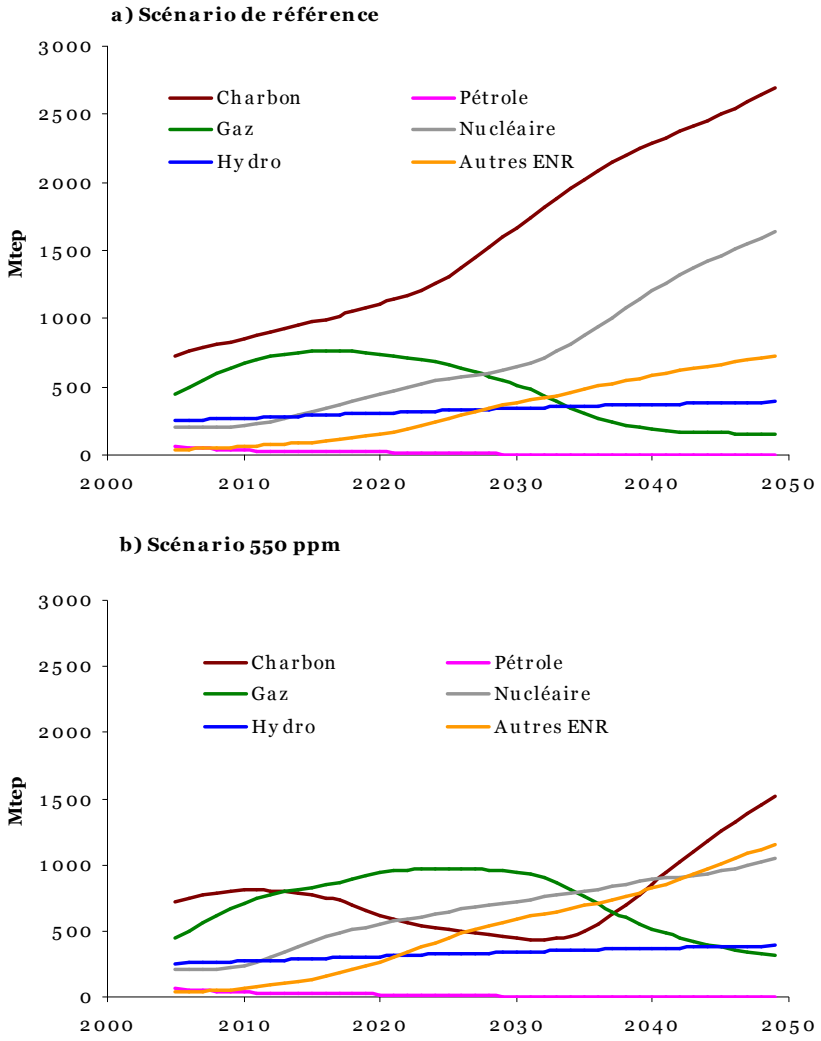


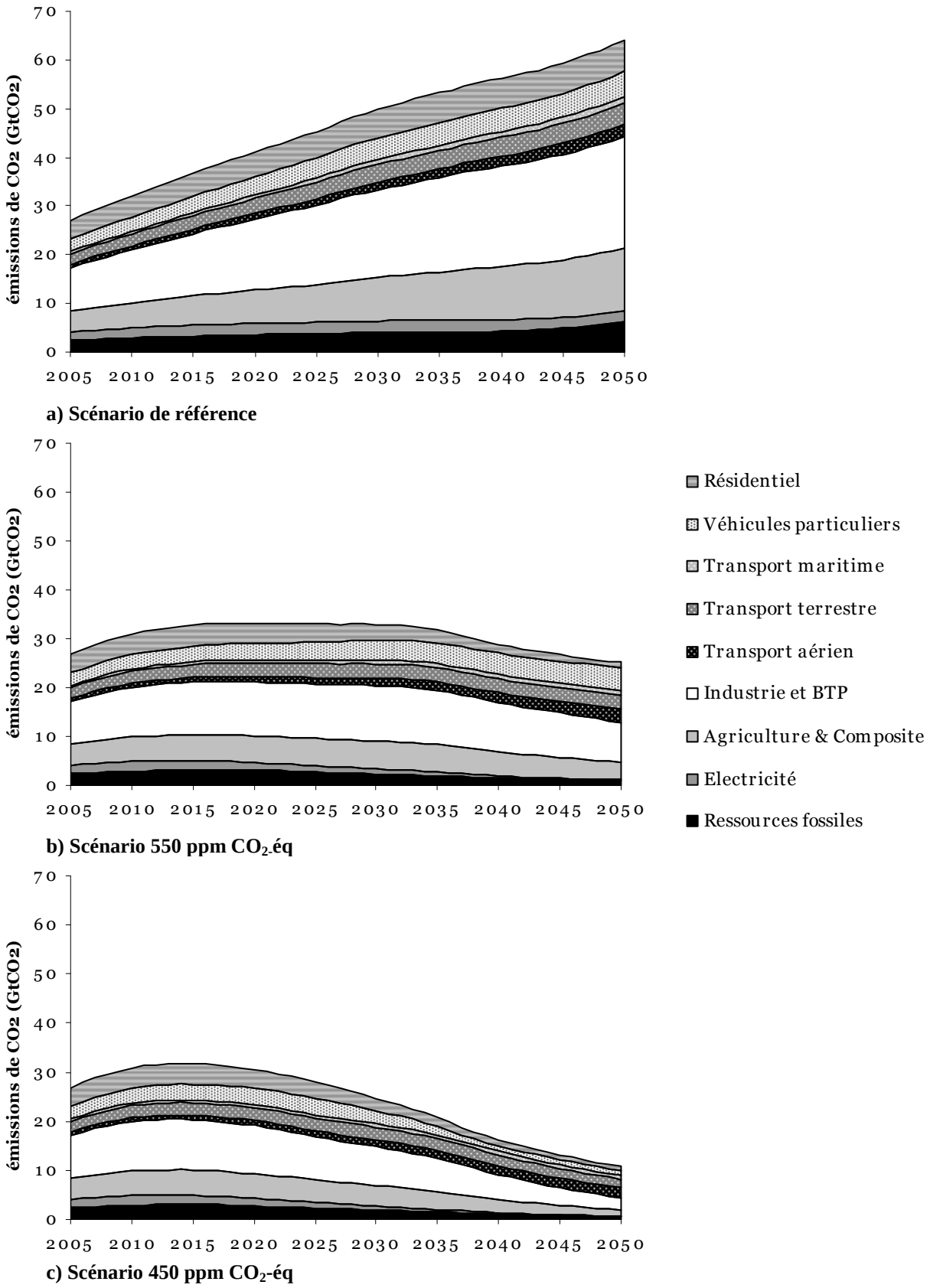
Figure 52 : Mix technologique de la production électrique – scénario 550 ppm

- La contribution des transports à l'effort global est très faible dans les deux scénarios de stabilisation : dans le scénario 550 ppm, l'aérien ne réduit que de 3% par rapport au scénario de référence en 2050, les véhicules particuliers de 10% et les autres transports terrestres de 32%, pour une contribution totale à l'effort global de 7% avec le transport maritime. Dans le scénario 450 ppm, la contribution des transports aux efforts *additionnels* monte à 31%, grâce à (i) une large pénétration des véhicules hybrides et électriques dans la flotte des véhicules particuliers, qui permet, pour une mobilité quasi inchangée, de réduire de 80 % les émissions par rapport au scénario de référence, (ii) des gains d'efficacité et une baisse d'activité de 8% dans l'aérien qui permettent de réduire les émissions de 24% en 2050, (iii) un report important du fret sur le rail qui permet une baisse de 58% des émissions des autres transports terrestres. Mais, au total, les réductions d'émissions venant des transports ne comptent que pour 15% des réductions totales dans le scénario 450 ppm.

Ces résultats suffisent à souligner à quel point la dynamique des transports constitue un point de blocage des politiques de réduction des émissions, susceptible d'exiger une croissance très élevée du signal prix pour parvenir à une réduction significative des émissions du secteur. En fait, cette observation découle de la combinaison de deux mécanismes représentés dans IMACLIM-R : d'une part la très faible élasticité de la mobilité motorisée et à grande vitesse au prix du CO_2, d'autre part les obstacles à la pénétration des technologies peu émettrices (fiscalité préexistante, réseaux, etc.). Ce résultat est originale par rapport aux approches de modélisation courante :

- Dans les modèles d'équilibre général classiques, de type EPPA par exemple, l'instauration d'un prix du carbone suscite des efforts de décarbonisation simultanés dans tous les secteurs : un prix élevé du CO_2 provoque des substitutions au niveau des indicateurs d'activités eux-mêmes (substitutions vers les activités peu carbonées) et au sein de chaque activité (substitutions vers les sources d'énergies non fossiles). Dans notre simulation, c'est le cas pour tous les biens et services sauf pour les activités de transport : celles-ci sont peu affectées par le prix du CO_2, qui devient pourtant très élevé dans le cas du scénario 450 ppm. En effet, dans ce scénario, en 2050, le trafic aérien ne baisse que de 8% par rapport à la référence, et le trafic routier est ramené au même niveau que dans la référence. On reconnaît ici le mécanisme de l'effet rebonds, connu pour être central dans le secteur des transports. D'un point de vue méthodologique, cet effet rebonds est représenté à travers le rôle du *budget temps* dans la représentation de la demande de mobilité : les autres biens et services qui rentrent dans la fonction d'utilité peuvent être substitués tandis que la mobilité reste, elle, soutenue par ce budget temps. La plupart des régions sont assez riches pour s'offrir des transports rapides (mais émetteurs) comme la voiture ou l'avion même avec une taxe carbone croissante. Par conséquent, ces scénarios révèlent des coûts marginaux de réduction très élevés dans le secteur des transports : pour infléchir les émissions du transport avec un instrument prix, il faut atteindre des niveaux de prix du CO_2 inacceptables pour les autres secteurs de l'économie. L'autre piste, que nous explorerons dans le chapitre suivant, consiste à se tourner vers d'autres outils de politiques et mesures que l'instrument « prix unique ».

- Dans les modèles technico-économiques, les indicateurs d'activité sont, à l'opposé des modèles d'équilibre général, pas ou peu affectés par la politique climatique, en particulier en l'absence de fonction d'utilité des ménages, de représentation des décisions de choix modal ou de bouclage macroéconomique. Pour les transports, ces modèles vont donc fournir des résultats proches de ceux d'IMACLIM-R, avec des tendances de mobilité peu affectées par le signal prix du carbone. Par contre, ces modèles présentent souvent une différence majeure du côté de la représentation des choix technologiques, en étant très optimistes sur la pénétration des nouvelles technologies, notamment parce qu'ils prennent rarement en compte les taxes préexistantes sur les carburants et surestiment donc l'effet d'un signal prix sur la profitabilité des nouvelles technologies. Par conséquent, dans ces modèles, un signal-prix élevé sur les émissions de GES ne provoquera pas forcément de baisse de la mobilité, ni de transferts modaux très importants, mais fera rapidement pénétrer les technologies alternatives de motorisation.



a) Scénario de référence

b) Scénario 550 ppm CO_2-éq

c) Scénario 450 ppm CO_2-éq

Figure 53 : Emissions mondiales par secteur dans les trois scénarios

2.2.3 Contributions régionales à l'effort de réduction global

L'exposé précédent masque de larges disparités régionales dans les contributions à l'effort global de réduction. La mesure de ces contributions régionales n'est pas triviale, parce qu'elle dépend sensiblement de l'indicateur choisi pour quantifier l'effort de réduction : pourcentage de réduction par rapport à un scénario de référence, volume de réductions cumulées, émissions par habitant, ratio émissions/PIB, coût macroéconomique, etc. Nous nous limitons ici à deux indicateurs : les réductions régionales relatives par rapport à la référence et l'évolution des émissions par habitant.

Le Tableau 28 fournit les pourcentages d'abattement réalisés en 2020, 2030 et 2050. Dans le scénario 550 ppm, les niveaux d'abattement sont très différents en début de période, mais ils apparaissent moins hétérogènes en 2050, s'échelonnant de 29% à 51%, sans différence claire entre PED et pays industrialisés. En fait, la sensibilité des économies à un signal prix faible, de l'ordre de 10 dollars par tonne de CO_2, est très variable, en fonction des prix intérieurs, des systèmes énergétiques préexistants et des dynamiques de croissance : ainsi l'Inde réalise 38% d'abattement tandis que les États-Unis n'atteignent que 9%. Par contre, lorsque le signal prix croît et se stabilise à 80 dollars par tonne de CO_2, la décarbonisation tend à s'homogénéiser dans toutes les régions et pour tous les secteurs dans lesquels il existe des technologies dont le coût est très inférieur à ce niveau de prix, en particulier dans les secteurs énergétiques et l'industrie. L'hétérogénéité des taux d'abattement en 2050 résulte des différences de structure du système énergétique dans la référence, de taux de renouvellement des équipements et de systèmes fiscaux préexistants. Dans le scénario 450 ppm, l'homogénéisation des efforts est plus frappante encore en 2050, puisque toutes les régions ont réalisé entre 74% et 89% d'abattement par rapport à la référence. L'hypothèse sous-jacente est que tout développement des technologies de décarbonisation est rapidement diffusé à l'international et bénéficie à l'ensemble des régions soumis à un prix du carbone suffisant.

Tableau 28 : Réductions des émissions de GES par rapport au scénario de référence

	550 ppm			450 ppm		
	2020	2030	2050	2020	2030	2050
USA	9%	28%	38%	12%	41%	81%
Canada	4%	21%	41%	8%	31%	79%
Europe	14%	27%	46%	18%	40%	77%
OCDE Pacifique	14%	27%	51%	20%	43%	74%
CEI	19%	35%	29%	24%	51%	88%
Chine	28%	36%	42%	37%	58%	87%
Inde	38%	47%	35%	47%	65%	89%
Brésil	17%	25%	48%	24%	45%	82%
Moyen-Orient	13%	34%	41%	20%	53%	82%
Afrique	26%	42%	37%	33%	57%	85%
Reste Asie	24%	36%	36%	30%	53%	85%
Reste Am Lat	12%	35%	39%	17%	48%	81%

Notre second indicateur, l'évolution des émissions par habitant, a l'avantage de ne pas dépendre du scénario de référence ; de plus il est important parce qu'il est fréquemment utilisé comme repère d'une répartition équitable des droits d'émissions dans l'atmosphère[110].

La Figure 54 fournit l'évolution des émissions par habitant dans les deux scénarios de stabilisation. Malgré l'apparence d'une convergence partielle des émissions, le calcul du coefficient de Gini inter-régional pour les émissions montre que la taxe unique mondiale ne diminue que très partiellement les inégalités : de 0.75 en 2005, ce coefficient atteint 0.68 en 2050 dans le scénario 550 ppm et seulement 0.71 dans le scénario 450 ppm. Ce calcul révèle d'ailleurs que le surcroît d'effort exigé pour respecter la trajectoire de stabilisation à 450 ppm *avec une taxe unique* débouche sur des inégalités d'émissions plus fortes que dans le cas 550 ppm, ce que la Figure 54 confirme d'une autre façon : dans le cas 450 ppm les émissions par habitant des pays en développement déclinent dès 2010 ou 2020, alors que dans le cas 550 ppm elles peuvent continuer à augmenter ou stagner jusqu'en 2040 voire 2050.

Si le système d'une taxe unique devait être remplacé par un système global de permis négociables sans restriction d'échanges, il faudrait décider d'une règle d'allocation internationale des quotas. Dans le paysage des multiples règles proposées lors des négociations ou dans la littérature, l'idée d'une convergence à long terme de la quantité de quotas par habitant se dégage régulièrement comme cible ultime, au nom d'un droit universel à émettre des GES. Si l'allocation des quotas devait respecter cette convergence en 2050, les transferts de quotas seraient considérables pour compenser la différence entre émissions effectives (Figure 54) et les allocations : un calcul rapide au premier ordre, sans tenir compte de l'impact macroéconomique que ces transferts ne manqueraient pas de provoquer, montre que ces transferts atteindraient, pour le scénario 550 ppm, +3% du PIB nominal en Afrique, +2% en Inde, -1.2% du PIB en CEI et moins de 1% pour les autre régions de l'OCDE. Pour le scénario 450 ppm, le prix de 450 dollar par tonne de CO_2 décuple ces transferts, qui atteignent +8% du PIB en Afrique, +6% du PIB en Inde, -4% du PIB en CEI, -1.2% en Europe, -1.7% aux USA. Ces chiffres nous invitent à penser que l'association d'un instrument de prix unique et une répartition des allocations convergeant vers une égalité par tête ne sont pas compatibles parce que de tels transferts seraient difficilement acceptables politiquement et économiquement.

Si le principe de convergence par tête devenait « la » référence éthique mondiale, il faudrait tenter de trouver des instruments de réduction permettant de se rapprocher *dans les faits* d'une convergence des émissions effectives par tête – ce qui suppose de différencier les prix du carbone, de demander plus d'efforts aux pays industrialisés et moins d'efforts aux PED qui sont encore en dessous de la valeur de convergence (Chine, Inde, reste de l'Asie, Afrique). Par contre, si la priorité commune reste de minimiser les coûts globaux sur le principe d'une égalisation du coût marginal d'abattement pour toutes les régions, alors il faudrait renoncer à une allocation par tête et privilégier des formules pouvant combiner différents indicateurs régionaux (Phylipsen et al., 1998 ; Ringius et al., 1998): performance CO_2 des économies (ratio émissions sur PIB), responsabilités historiques, contraintes locales (climat, étendue du territoire), etc.

[110] Nous sommes nous même très réservés sur le caractère équitable d'une convergence à terme des émissions par tête, étant donné que les besoins de services énergétiques et de mobilité dépendent de la localisation dans le monde, et que la production globalisée d'une part des biens et services que nous consommons rend complexe une juste attribution des émissions liées à cette production.

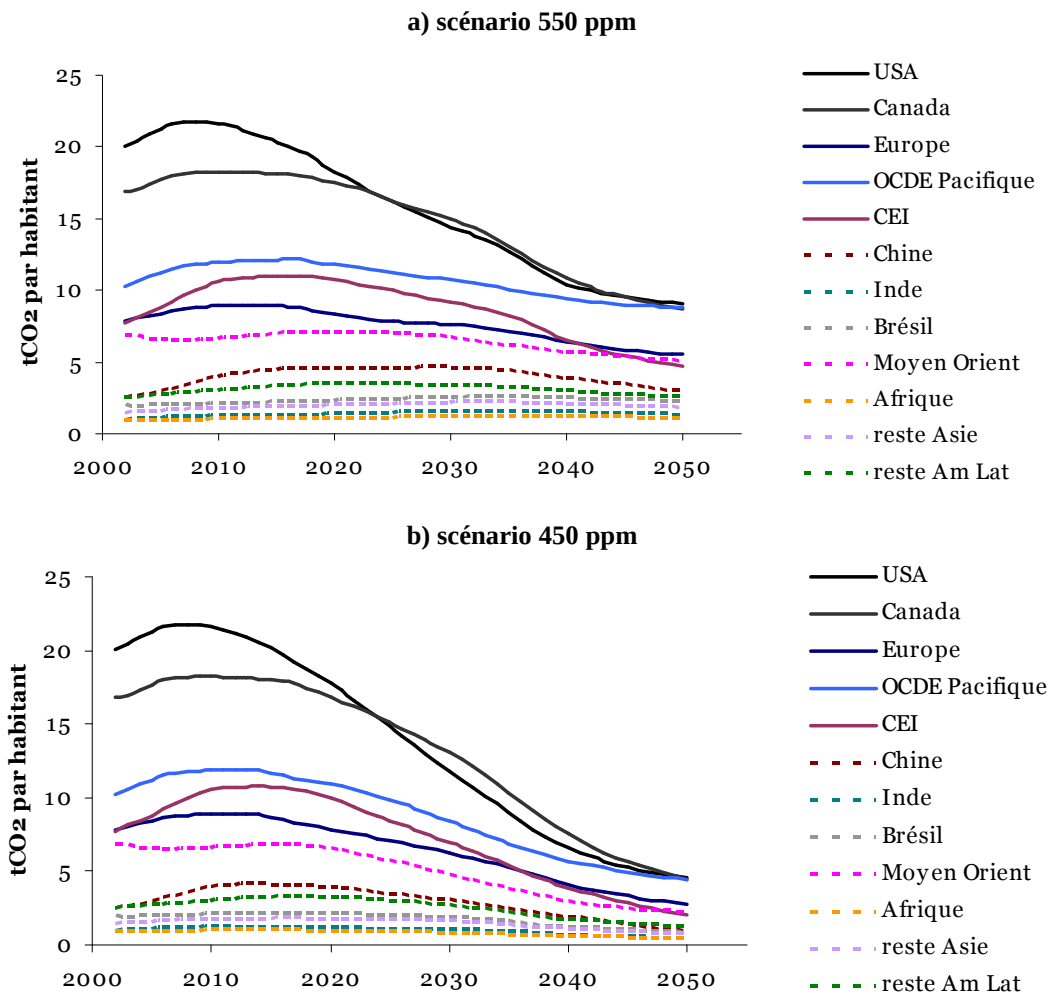


Figure 54 : émissions par habitant

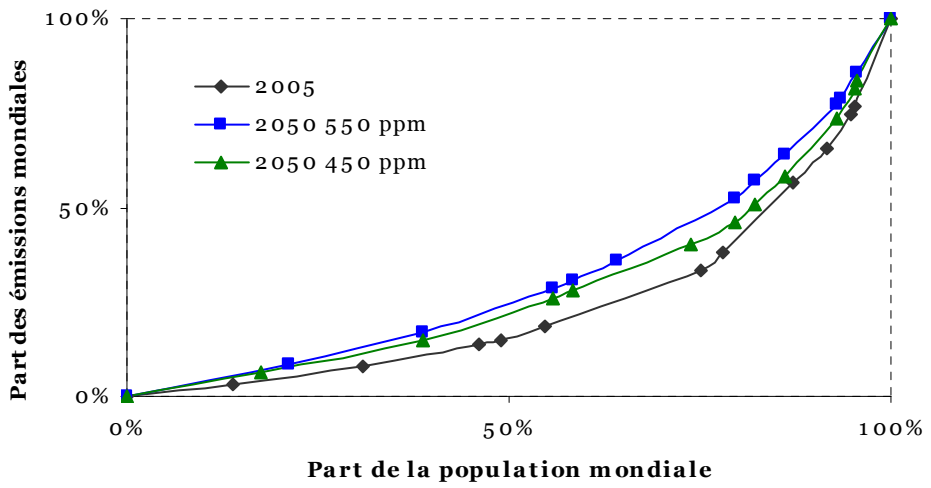


Figure 55 : Inégalité mondiale de répartition des émissions de GES en fonction de la population

2.3 Bilan macroéconomique : une transition impossible ?

Les simulations réalisées dans ce chapitre apportent un nouvel éclairage sur la question des coûts macroéconomiques de la stabilisation des concentrations de GES, et plus particulièrement sur les coûts d'une taxe internationale sur le CO_2, quel que soit le scénario de réduction examiné. Le Tableau 29 fournit le bilan macroéconomique des deux trajectoires de stabilisation calculées dans ce chapitre, tel qu'il ressort de la somme actualisée[111] des pertes sur la période 2010-2050. Ces chiffres agrégés dans le temps suscitent un premier diagnostic contrasté. Dans un certain nombre de régions, l'impact macroéconomique peut être considéré comme faible car inférieur à 1% du PIB cumulé actualisé : cela concerne les Etats-Unis, l'Europe, les pays de l'OCDE Pacifique, le Brésil, le Reste de l'Asie pour les deux scénarios de stabilisation, ainsi que l'Afrique et le Reste de l'Amérique Latine pour le scénario 550 ppm seulement. Dans les autres régions, les pertes vont de 1.6% à 9.8% pour le scénario 550 ppm CO_2-equivalent et de 2.4% à 25.1% pour le scénario 450 ppm CO_2-equivalent, des pertes qui dépassent largement les résultats usuels rassemblés dans les rapports successifs du GIEC.

Tableau 29 : Pertes actualisées de PIB réel (PPA) par rapport au scénario de référence sur la période 2010-2050

	550 ppm	450 ppm
USA	-0.5%	-0.6%
Canada	-1.6%	-4.3%
Europe	-0.6%	-0.5%
OCDE Pacifique	-0.7%	-0.5%
CEI	-5.5%	-14.0%
Chine	-9.8%	-18.6%
Inde	-4.3%	-6.1%
Brésil	-0.8%	-0.7%
Moyen-Orient	-4.6%	-25.1%
Afrique	-0.6%	-2.4%
Reste Asie	-0.7%	-1.0%
Reste Am Lat	-1.7%	-4.3%

Ces résultats surprendront par leur pessimisme les familiers de la littérature internationale sur les coûts des politiques climatiques. Ils remettent en tout cas en cause la célèbre métaphore du lapin dans un ragoût d'éléphant (Hogan et Manne, 1977), selon laquelle l'effet d'une taxe carbone sur le secteur de l'énergie (le lapin) ne peut avoir qu'un impact très limité sur le reste de l'économie (le ragoût à l'éléphant), simplement à cause du rapport de taille du secteur énergétique par rapport à l'économie entière. Ici, dans les régions dont la croissance est la plus touchée, l'impact cumulé sur toute la trajectoire se révèle supérieur au poids du secteur énergétique dans l'économie. En fait le modèle prend en compte à la fois les effets statiques de propagation intersectoriels et les répercussions dynamiques du ralentissement de la croissance sur les périodes suivantes, des mécanismes qu'ignore la métaphore de l'éléphant et du lapin.

Pour bien interpréter les raisons de ce pessimisme et limiter les risques d'optique, il nous faut d'abord rappeler que :

(i) Les enveloppes d'émissions qui correspondent aux deux scénarios sont très contraignantes pour l'économie mondiale ; elles exigent une inversion de l'évolution des émissions à

[111] Les taux d'actualisation ont été différenciées entre pays industrialisés (2%), CEI (3%) et pays émergents et en développement (5%).

partir de 2015 (pour 450 ppm CO_2-eq) ou 2020 (pour 550 ppm CO2-eq), à contre-courant des forces motrices de la hausse des émissions très dynamiques dans les pays émergents ;

(ii) Les politiques simulées correspondent à un dispositif de taxation mondiale uniforme et répercutée sur tous les agents économiques sans exception, un dispositif très simple qui traduit mécaniquement la préconisation de la vulgate économique d'une valeur du carbone unique, mais sans y adjoindre de transferts compensatoires. Le semi-échec des négociations ayant précédé le protocole de Kyoto, dont le cœur constitue aussi une application du « prix unique », a montré que cette préconisation bute effectivement contre des réticences politiques majeures, symptomatiques des larges difficultés économiques anticipées par les décideurs et que nous semblons retrouver dans nos résultats.

(iii) La construction du modèle IMACLIM-R a été motivée dès le départ par un diagnostic sur les lacunes des outils existants et par l'abandon d'un certain nombre d'hypothèses de flexibilité, d'anticipation parfaites et d'optimalité – des hypothèses qui expliquent les faibles coûts de transition calculés dans la majorité des modèle existants. Il n'est donc pas surprenant que les effets de propagation du prix du carbone soient plus élevés dans nos simulations que dans les évaluations courantes, étant donné les inerties et les imperfections des décisions des agents économiques.

Cependant, il ne s'agit pas de s'en tenir à ce pessimisme aggravé sur le coût des réductions, et de conclure que la réduction des émissions coûte beaucoup plus cher qu'annoncé[112]. Il faut bien sûr aller plus loin, d'abord en prenant acte d'un certain nombre de difficultés jusqu'ici sous-estimées dans l'étude des trajectoires de stabilisation, puis en s'efforçant de chercher les moyens de réduire ces difficultés. En faisant cela nous pourrons tenter de combler l'écart entre les craintes des décideurs et l'optimisme des évaluations usuelles. Si le réalisme de nos simulations peut être remis en question, ce n'est pas parce que de telles pertes ne sont pas possibles – nous expliquerons ci-dessous en détail les mécanismes qui peuvent induire un ralentissement cumulé de cette ampleur – mais bien parce qu'il est improbable que les décideurs des principaux pays émetteurs s'engagent sur un système de régulation qui comporte des risques macroéconomiques de cette ampleur. L'enjeu est donc, dans ce chapitre, de comprendre l'origine des risques macroéconomiques liés au cas d'un système de taxation uniforme traduisant la préconisation standard d'un prix unique répercuté intégralement dans toutes les économies pour égaliser tous les coûts marginaux d'abattement. Le chapitre suivant sera ensuite consacré à étudier quelques pistes qui seraient susceptibles de diminuer considérablement la facture finale des politiques de réduction, parmi les nombreuses possibilités d'aménagement du système de taxation élémentaire, comme les différentes mode de recyclage des ressources de la taxe, la différenciation des prix du carbone pour certains secteurs vulnérables, les transferts de compensations, etc.

2.3.1 Chronogramme des pertes : deux décennies de transition coûteuse

Le chronogramme des coûts macroéconomiques tout au long de la trajectoire permet de dégager des renseignements plus complets que le bilan des pertes actualisées. Pour une majorité de pays, les

[112] La première réaction des collègues économistes du changement climatique, lorsqu'ils sont confrontés à ces résultats, est de les rejeter vigoureusement, en utilisant l'argument qu'ils sont hors de l'intervalle habituel décrit par tous les autres modèles. En fait, plusieurs d'entre eux ont exprimé leur crainte que de tels résultats alimentent les arguments de l'inaction. Au contraire, notre objectif explicite est de chercher les modalités d'implémentation qui permettraient de minimiser les coûts de transition que nous observons ici.

coûts suivent un profil « en V », constitué d'une première phase de ralentissement cumulatif de la croissance jusqu'en 2025-2030 puis d'un seconde phase de rattrapage de la croissance de référence dans la seconde moitié de la période (Tableau 30). Ce profil de coût évoque un effort de transition dans des économies au départ intenses en carbone, ou en train de le devenir, à des économies peu intenses en carbone (cf. Figure 54).

Examinons d'abord la période 2010-2030 dans les deux scénarios de stabilisation. Dans le cas 550 ppm CO2-eq, le ralentissement de la croissance est de 0.05% par an pour les pays occidentaux, mais il atteint 0.17% pour l'Inde, 0.27% pour la CEI, 0.44% pour le Moyen-Orient et 0.69% pour la Chine. Dans le cas 450 ppm CO2-eq, le ralentissement de cette période est accentué pour tous les pays : les Etats-Unis freinent de 0.08% par an, l'Europe de 0.1%, la CEI de 0.86%, l'Inde de 0.67% et la Chine de 1.87% et le Moyen-Orient de 2.15% par an ! Ces chiffres, cumulés de manière permanente sur 20 ans, débouchent sur une image frappante des pertes « instantanées » si l'on regarde en coupe les chiffes de 2030. Dans le scénario 450 ppm CO2-eq, la Chine ou le Moyen-Orient ont pris un retard de 30 à 40 % de croissance du PIB en 2030, qui correspond respectivement à 7 et 5 années de la croissance de référence.

Le pessimisme prononcé de cette phase de transition est compensé par le tableau des deux décennies suivantes, puisque dans la période 2030-2050, la majorité des pays connaîtraient un rattrapage de croissance suffisamment important pour compenser le ralentissement de la période précédente, avec des taux de croissance supérieurs à ceux du scénario de référence (signalés en gras dans le Tableau 30). Les pays qui font exception à ce rattrapage sont : uniquement la CEI dans le scénario 550 ppm CO2-eq, à laquelle s'ajoutent le Canada et le Moyen-Orient dans le scénario 450 ppm CO2-eq. Ces pays sont les trois principaux exportateurs de ressources fossiles dans le scénario de référence, donc les politiques de réduction privent leur croissance des revenus pérennes des exportations d'énergies fossiles.

Tableau 30 : taux de croissance annuel moyen du PIB réel, 2010-2030 et 2030-2050

	2010-2030			**2030-2050**		
	REF	550 ppm	450 ppm	REF	550 ppm	450 ppm
USA	2.33%	2.29%	2.25%	2.37%	**2.45%**	**2.46%**
Canada	3.08%	2.95%	2.77%	2.83%	**2.86%**	2.69%
Europe	2.68%	2.62%	2.57%	2.07%	**2.16%**	**2.23%**
OCDE Pacifique	2.36%	2.31%	2.28%	1.65%	**1.70%**	**1.74%**
CEI	3.42%	3.16%	2.56%	2.19%	1.90%	1.08%
Chine	5.04%	4.34%	3.17%	2.36%	**3.10%**	**3.61%**
Inde	7.66%	7.50%	7.00%	4.89%	**5.52%**	**6.16%**
Brésil	4.50%	4.49%	4.33%	3.45%	**3.79%**	**4.12%**
Moyen-Orient	6.03%	5.60%	3.89%	2.78%	**3.61%**	2.12%
Afrique	6.23%	6.21%	5.93%	5.37%	**5.69%**	**5.96%**
Reste Asie	5.92%	5.92%	5.78%	4.41%	**4.67%**	**4.87%**
Reste Am Lat	4.90%	4.77%	4.54%	3.38%	**3.46%**	**3.40%**

Note : les chiffres en gras correspondent à un rattrapage de la croissance en seconde période

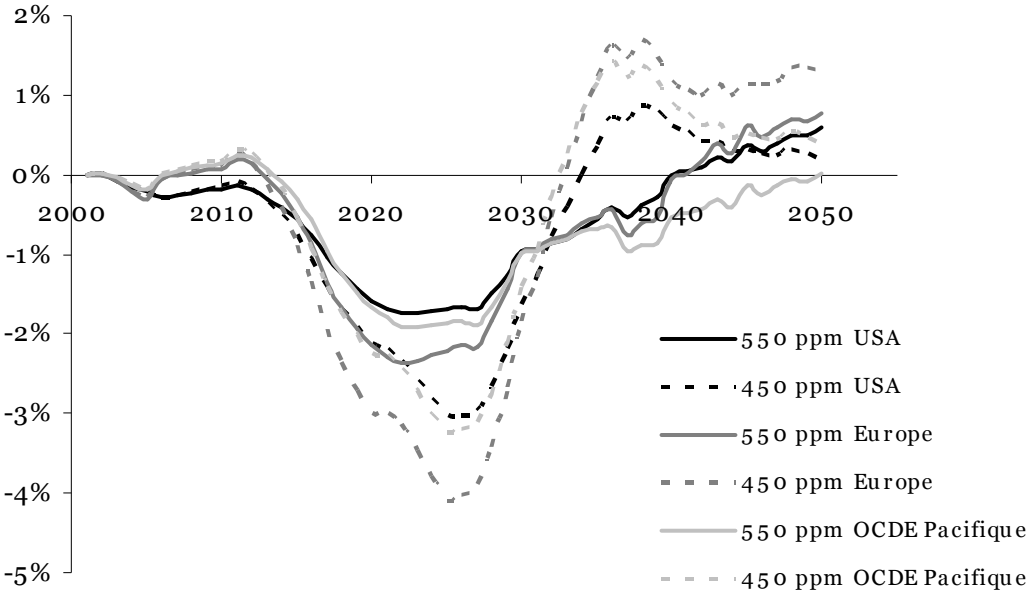


Figure 56 : Chronogramme des pertes de PIB réel, USA Europe et OCDE Pacifique

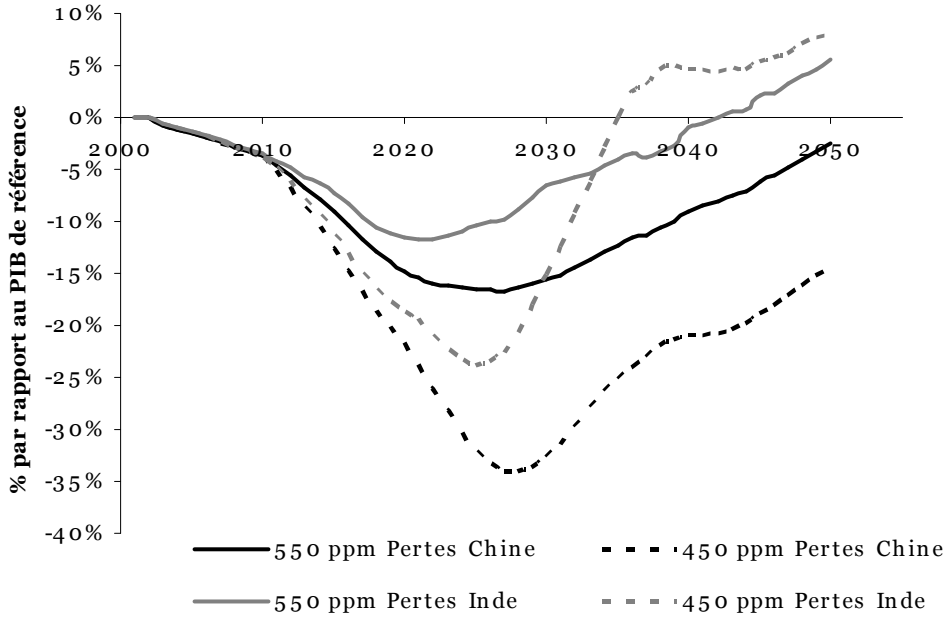


Figure 57 : Chronogramme des pertes de PIB réel, Chine et Inde

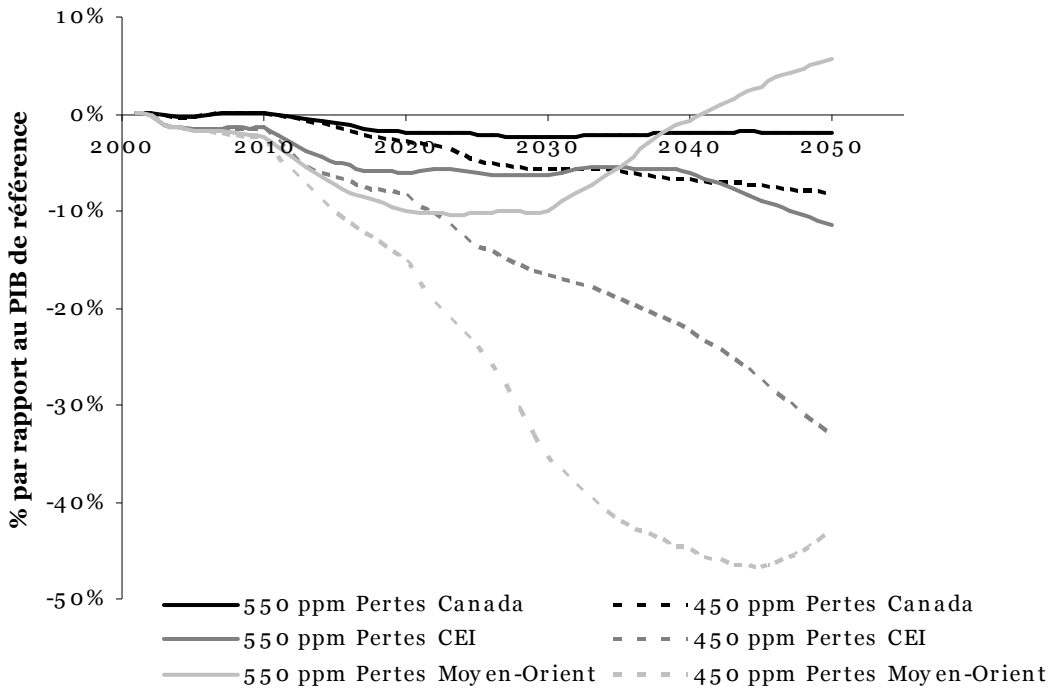


Figure 58 : Chronogramme des pertes de PIB réel, CEI, Moyen-Orient et Canada

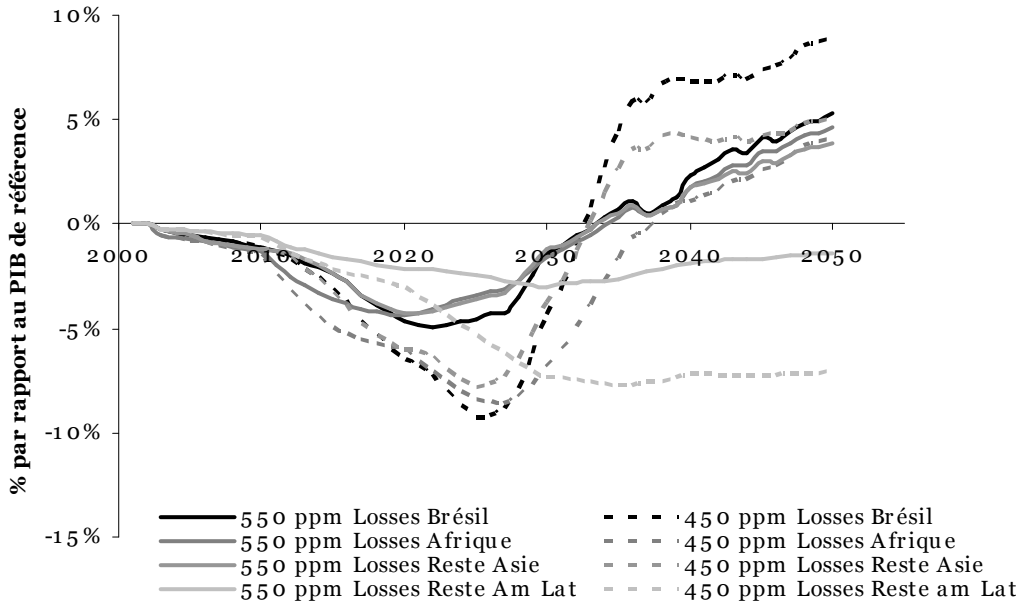


Figure 59 : Chronogramme des pertes de PIB réel, Brésil, Afrique, Reste de l'Asie et Reste de l'Amérique Latine

Les baisses de croissance observées dans tous les pays durant la transition 2010-2030 découlent principalement de deux mécanismes : le fardeau de la taxe sur les émissions dans des économies dont la décarbonisation n'est que progressive et les modifications de flux commerciaux de ressources fossiles. Les résultats du modèle montrent très clairement que l'ampleur du ralentissement selon les pays est directement liée à l'intensité carbone des économies en début de période, qui ne peut se résorber plus vite que le rythme de renouvellement du capital. La Figure 60 donne l'intensité carbone des économies régionales représentées dans le modèle, en 2005 puis en 2025, mesurée en tonnes de

CO_2 par dollar de PIB *nominal* pour donner une indication de l'effet direct d'une taxe uniforme libellée en dollars. Il apparaît clairement en 2005 que la CEI, la Chine et l'Inde forment le trio le plus intense en carbone, suivies par le Moyen-Orient, l'Afrique et le Reste de l'Asie. L'intensité carbone du PIB en Chine, en Inde et dans la CEI – respectivement de 2.4, 2.1 et 1.7 tonnes de CO2 par milliards de dollars de PIB en 2005 – est nettement supérieure à celle des autres régions du monde – située entre 0.4 et 1.1 tCO2/G$. A cause de cela, le fardeau de la taxe carbone uniforme que doivent supporter secteurs productifs et consommateurs finaux est supérieur dans ces pays et l'effet sur la croissance est aussi nettement plus visible. Au contraire, les pays de l'OCDE, moins intenses en carbone, sont moins impactés par la taxe carbone. L'examen des mêmes indicateurs en 2025 pour les trois scénarios – Référence, 550 ppm CO2-eq, 450 ppm-CO2-eq – montre que l'écart d'intensité carbone persiste en 2025, sans différence importante entre les scénarios. Pourtant, sous l'effet de la taxe carbone croissant rapidement, le rattrapage très rapide du progrès technique, en particulier avec des nouveaux équipements qui permettent des sauts discontinus dans le niveau technologique des pays en développement (*leapfrogging*), devrait favoriser la résorption de l'écart d'intensité énergétique avec les autres régions. En fait, il existe deux mécanismes simultanés qui entretiennent la persistance d'une intensité énergétique élevée : (i) **l'inertie des équipements** installés et des anciennes technologies encapsulées dans ces équipements, (ii) les **puissantes dynamiques de rattrapage** des niveaux d'équipements, d'infrastructures et d'industrialisation, dans ces deux pays. Ces dynamiques contribuent à empêcher l'intensité énergétique du PIB de baisser beaucoup plus que dans le scénario de référence, précisément parce que ces dynamiques sont inélastiques au prix du carbone.

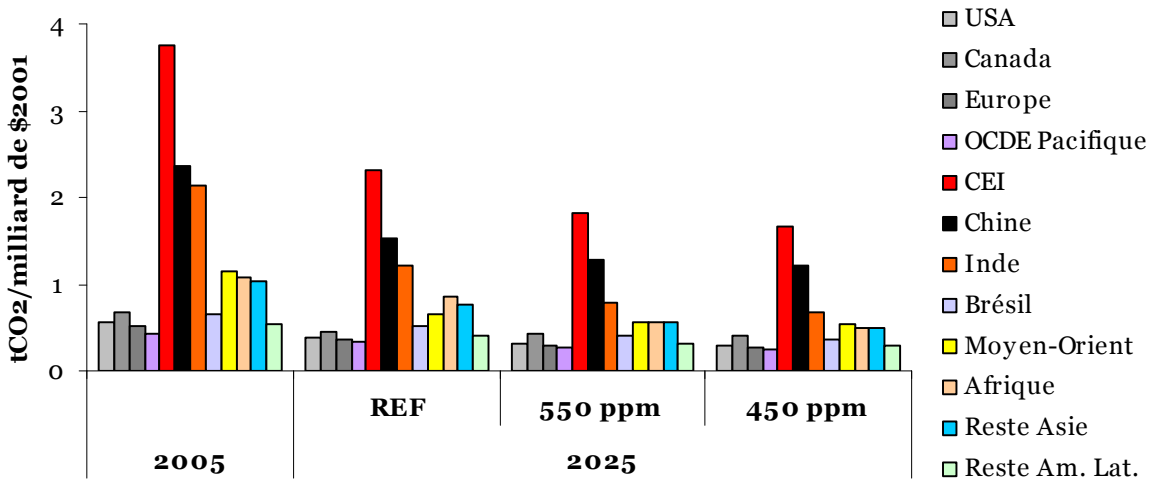


Figure 60 : Intensité carbone du PIB par régions en 2005 et en 2025 dans les trois scénarios[113]

Pour illustrer que l'on bute rapidement contre la contrainte de rythme de renouvellement des capacités de production et des technologies qui y sont encapsulées, il suffit de regarder le secteur électrique, qui est pourtant l'un des mieux organisés pour fonder ses décisions sur des anticipations des prix futurs à 20 ou 30 ans. Entre 2001 et 2020, les capacités de production de la Chine et de l'Inde augmentent très rapidement – à des taux respectifs de 6.2% et 6.8 % par an, contre 2% par an en moyenne dans les régions de l'OCDE – mais ces capacités restent largement fondées sur le charbon,

[113] Cette intensité énergétique du PIB est calculée à partir du PIB nominal, qui est la bonne mesure pour traduire la sensibilité d'une économie à une taxe harmonisée et libellée en dollars. A partir d'un PIB en Parités de pouvoir d'achat (PPA), les disparités auraient été moins importantes.

comme le montre la Figure 61, à cause de l'inertie des équipements installés et de l'horizon d'anticipation limité à 30 ans des producteurs d'électricité[114].

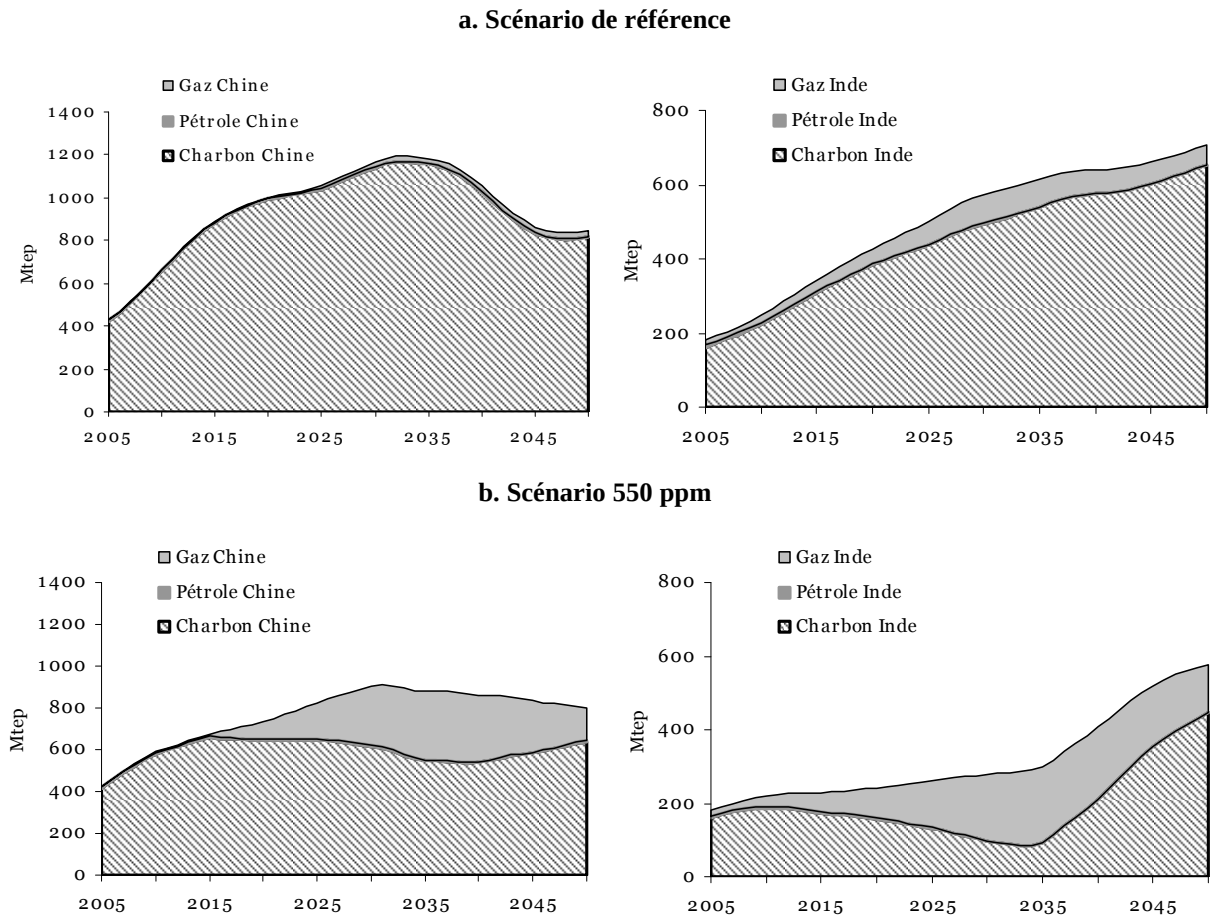


Figure 61 : Energies fossiles consommées par le secteur électrique en Chine et en Inde, REF et 550 ppm

Le fardeau lié au poids de la taxe carbone croissante sur des économies dont le rythme de décarbonisation est borné par le rythme de renouvellement des capacités et les capacités d'anticipation impacte directement les ménages en pinçant leur budget non énergétique et augmente les coûts énergétiques de production de tous les biens et services. La Figure 62 montre d'une part l'effet d'éviction de la taxe sur les dépenses non énergétiques des ménages et d'autre part le surcoût moyen de production d'un bien dans le secteur industriel, par rapport au scénario de référence. Dans les deux scénarios, l'effet de la taxe sur la consommation finale des ménages est le plus grand en Inde et en Chine, tandis que les ménages de l'OCDE subissent un effet d'éviction inférieur à 5%. Au Moyen-Orient, l'effet dominant sur la consommation est celui de la perte de revenus d'exportations, comme nous le verrons un peu plus loin. En Chine, l'effet de fort ralentissement de la consommation est doublé d'un fort surcoût de production des biens industriels, qui implique une perte de compétitivité non négligeable.

[114] Le retour du charbon après 2035 serait permis par l'équipement systématique des nouvelles centrales avec un dispositif de capture et séquestration du carbone.

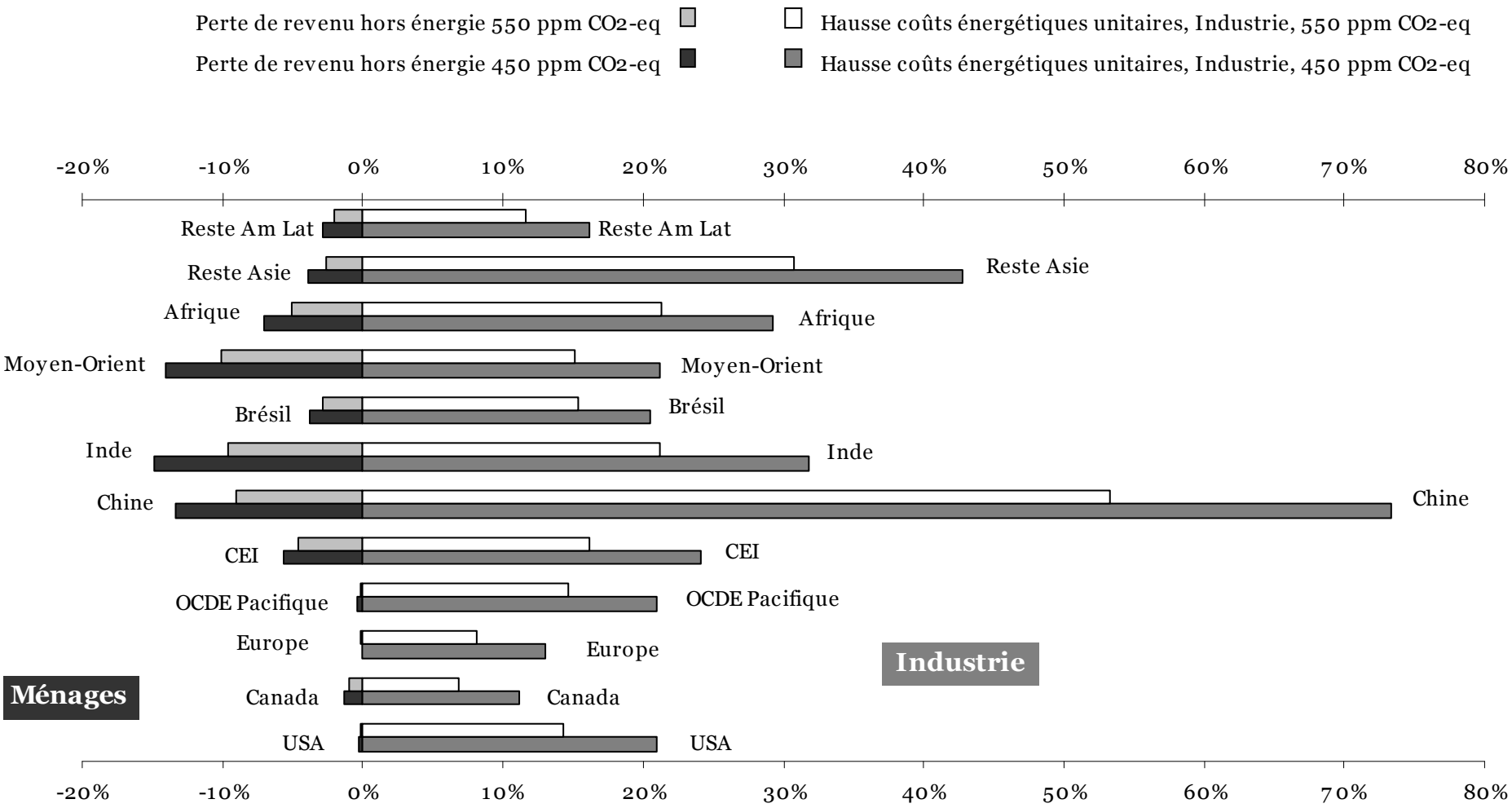


Figure 62 : Hausse du fardeau énergétique pendant la transition [2015, scénarios 450 et 550 ppm CO2-eq] :
(i) Perte de revenu hors énergie pour les ménages, (ii) hausse des coûts énergétiques unitaires par unité de bien industriel produit

Il apparaît ainsi que la taxe internationale touche fortement la Chine sur les deux mécanismes qui alimentent sa croissance dynamique dans le scénario de référence : le décollage de la consommation intérieure et les exportations de biens. Un effet de taux de change apparaît pour rééquilibrer la perte de compétitivité : les indices des prix à la consommation en Chine et en Inde sont inférieurs de 3% par rapport au scénario de référence en 2015. Cet effet, s'il est de second ordre, aggrave un peu plus le fardeau de la taxe, libellée en dollars, par rapport au revenu des ménages dont l'évolution est aussi indexée sur les prix domestiques.

Enfin, la transition est aussi caractérisée par des besoins supplémentaires d'investissement dans les secteurs de production d'énergie mais aussi dans les secteurs consommateurs d'énergie pour financer des équipements plus efficaces. La représentation de ces besoins d'investissement supplémentaire est partielle dans le modèle : elle est correctement suivie dans le secteur de production d'électricité, où la représentation détaillée des technologies permet un comptage explicite des financements nécessaires pour implémenter les technologies peu carbonées, mais dans les secteurs plus agrégés du bâtiment, de l'industrie ou du composite, le surinvestissement n'est pas pris en compte dans la version actuelle du modèle. En fait cette faiblesse méthodologique est principalement liée à la difficulté de dégager un paramétrage agrégé du besoin d'investissement dans ces secteurs, alors que les données technologiques sont déjà difficiles à réunir, ainsi qu'aux incertitudes sur le progrès technique et les normes futures. Plus précisément, la fixation de normes d'élimination progressive mais totale des équipements peu efficaces peut induire un progrès technique tel qu'après une phase de transition indéterminée, le coût d'investissement des technologies peu émettrices soit devenu égal ou plus faible à l'ancien coût d'installation des technologies obsolètes et interdites.

Dans le secteur électrique, les chiffres de l'investissement additionnel nécessaire (Tableau 31) dans les scénarios de stabilisation témoignent de la coexistence de plusieurs mécanismes :

- Le surcoût d'investissement des technologies peu émettrices : cet effet apparaît très nettement sur la période 2001-2015, surtout dans les régions dont le parc était constitué dans le scénario de référence de centrales thermiques peu chères (USA, CEI, Chine, Inde) ; il réapparaît aussi nettement en fin de période lorsque le recours aux centrales thermiques équipées de capture et séquestration du CO2, plus coûteuses, devient important.

- L'effet modérateur du progrès technique induit sur les coûts fixes des énergies renouvelables : cet effet n'est pas observable directement mais il contribue à permettre une réduction des besoins d'investissement supplémentaire au-delà de 2015 ;

- La variation des besoins de capacités (Tableau 32), résultante des gains d'efficacité du côté de la demande (-), du ralentissement de la croissance économique (-) et d'une substitution importante vers l'électricité (+) : pour l'Europe et l'OCDE Pacifique, pays dans lesquels la part de l'électricité est déjà élevée, cette résultante est négative ; pour les Etats-Unis, le Canada, la Chine, l'Inde, l'Afrique, le Reste de l'Asie et de l'Amérique Latine, l'effet de substitution vers l'électricité domine l'effet cumulé des gains d'efficacité et du ralentissement de la croissance ; dans la CEI, les larges marges de gains d'efficacité permettent une baisse nette de capacité par rapport à la référence.

Tableau 31 : Investissement cumulé additionnel dans le secteur électrique, scénario 550 ppm CO2-eq

	2001-2015	2001-2030	2001-2050
USA	29%	3%	15%
Canada	12%	0%	10%
Europe	0%	-12%	-11%
OCDE Pacifique	9%	-31%	-22%
CEI	14%	-13%	-14%
Chine	45%	57%	37%
Inde	22%	38%	37%
Brésil	12%	4%	-5%
Moyen-Orient	-1%	-27%	-20%
Afrique	1%	17%	18%
Reste Asie	36%	28%	31%
Reste Am Lat	20%	28%	15%

Tableau 32 : Variation des capacités de production électrique, 550 ppm CO2-eq vs. Référence

	2015	2030	2050
USA	12%	16%	21%
Canada	6%	4%	17%
Europe	2%	**-5%**	**-19%**
OCDE Pacifique	3%	**-30%**	**-28%**
CEI	7%	**-9%**	**-23%**
Chine	27%	62%	23%
Inde	13%	50%	42%
Brésil	8%	8%	**-12%**
Moyen-Orient	**-1%**	**-28%**	**-32%**
Afrique	3%	19%	20%
Reste Asie	20%	45%	29%
Reste Am Lat	9%	29%	12%

2.3.2 Un bilan positif à long terme lié à une meilleure anticipation de « l'après-fossiles »

Finalement, en 2050, de nombreux pays atteignent un niveau de PIB supérieur ou égal à celui de la référence : les USA, l'Europe et la région OCDE Pacifique rejoignent le niveau de PIB de la référence ; l'Inde, le Brésil, le Moyen-Orient, les régions Afrique et Reste de l'Asie connaissent un niveau de PIB supérieur de 3 à 6% à celui de la référence. Le fait que les trajectoires de stabilisation puissent mener à long terme à un niveau de PIB plus élevé surprend un certain nombre d'économistes modélisateurs qui assimilent trop vite le modèle IMACLIM-R à un modèle d'équilibre général « classique », dans lequel une trajectoire de référence est optimale en tout point du temps, si bien qu'une contrainte environnementale est toujours une distorsion coûteuse. Ici ce bilan positif s'explique par le fait que le scénario de référence n'est pas optimal, c'est-à-dire qu'il ne résulte pas, en chaque point de la trajectoire, d'une maximisation du PIB ou du bien-être collectif. Grâce à la politique climatique et au découplage forcé entre croissance et usage des ressources fossiles, les pays en

développement bénéficient d'une protection contre la hausse des prix des énergies fossiles, une hausse qui, dans le scénario de référence, représente un frein à la croissance au-delà de 2030.

Par ailleurs, il faut rappeler que dans cette version du modèle nous avons maintenu une description exogène des gains de productivité du travail[115]. Autrement dit, la croissance « potentielle » permise par l'évolution démographique et les gains de productivité est inchangée dans les scénarios de stabilisation. Cette croissance potentielle, qui ne peut se déployer complètement dans la période de transition à cause des effets d'éviction présentés ci-dessus, est en quelque sorte décalée dans les décennies suivantes, où l'accumulation de capacités « manquantes » peut être rattrapée grâce au relâchement de la contrainte énergétique. Si l'on compare « la frontière des possibles » dans le scénario de référence et dans le scénario de stabilisation, il est net que la situation du scénario de stabilisation est meilleure, puisque (i) les gains de productivité du travail dans chaque secteur sont inchangés, (ii) le progrès technique induit par la politique climatique améliore l'accès aux technologies innovantes, (iii) la hausse des tensions sur les ressources épuisables a été limitée.

2.3.3 Incertitudes autour des stratégies des producteurs de fossiles en réaction aux politiques climatiques mondiales

Les pays exportateurs de ressources fossiles – la CEI, le Moyen-Orient et dans une moindre mesure le Canada – subissent des pertes actualisées importantes, allant de -1.6% à 5.5% dans le scénario 550 ppm et de -4% à -25% dans le scénario 450 ppm. Ces pertes témoignent de l'effet cumulé des moindres volumes d'exportation de ressources fossiles sur la consommation et sur l'accumulation nécessaire à la croissance économique. La Figure 65 montre que les pertes de revenus liées à la baisse des exportations de ressources fossiles sont très significatives quand on les compare au PIB du scénario de référence. Pour les trois régions, ce manque à gagner est du même ordre que la diminution actualisée du PIB par rapport au scénario de référence, ce qui laisse penser que le coût de la contrainte carbone domestique dans cette région est de second ordre par rapport aux pertes liées à la diminution du volume de pétrole consommé (et de gaz en fin de période).

Il faut noter que la substitution du pétrole et du charbon vers le gaz naturel, qui constitue une option de réduction peu chère pendant la période de transition, représente une opportunité de gains significatifs, principalement pour la CEI, entre 2010 et 2030. Au-delà de cette période, les exportations de gaz subissent elles aussi un ralentissement fort, qui vient s'ajouter au manque à gagner sur les exportations de pétrole. Pendant la période de transition, les revenus additionnels des exportations de gaz permettent de compenser les pertes dues au fardeau de la taxe qui devraient être élevées, comme dans les autres régions à haute intensité carbone (surtout Inde et Chine), ce qui explique la situation relativement bonne de la CEI jusqu'en 2040 dans le scénario 550 ppm CO2-eq (Figure 58).

La situation particulière du Moyen-Orient mérite un coup de projecteur supplémentaire. Comme le montre la Figure 65, la trajectoire des exportations de pétrole au Moyen-Orient est singulière par rapport aux baisses d'exportations observées pour le Canada et la CEI :

- Dans le scénario 550 ppm, le Moyen-Orient subit un manque à gagner significatif mais maîtrisé puisqu'il ne dépasse pas -6% du PIB de référence en 2030. Mais, surtout, en 2050, le Moyen-Orient parvient à faire remonter ses exportations au même niveau, en valeur, que le scénario de référence. Cet effet de rattrapage provient de la position de producteur d'ajustement du Moyen-Orient par rapport aux producteurs fatals que sont les autres régions (Figure 64). Jusqu'en

[115] Il est possible d'inclure dans le modèle une relation endogène entre rattrapage de productivité et investissement cumulé, mais ce mécanisme, qui ajoute une complexité aux résultats déjà riches présentés ici, sort du cadre de cette thèse et fait l'objet d'une étude spécifique (Sassi, 2008).

2025, c'est le Moyen-Orient qui amortit la baisse de la demande mondiale, pour maintenir un prix à 70 dollars le baril, conformément à l'hypothèse exogène qui est imposée dans le modèle. Entre 2025 et 2035, les autres régions sont elles aussi progressivement touchées par la baisse de la demande mondiale. Après 2035, l'OPEP regagne des parts de marché parce que l'écart entre la demande totale et la production des autres producteurs s'agrandit. Le prix quitte le plafond des 70 dollars l'OPEP avec un décalage de seulement un ou deux ans par rapport au scénario de référence et l'OPEP engrange à nouveau de substantiels revenus d'exportations, d'autant plus que ses réserves ont été « économisées » dans les deux périodes précédentes pour s'ajuster au marché.

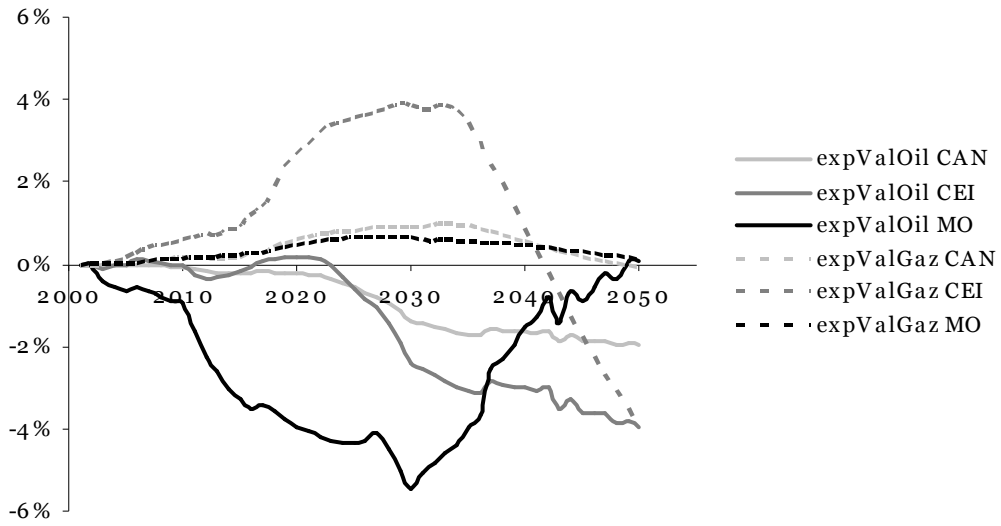


Figure 63 : Ratio des variations des exportations de pétrole et gaz en valeurs par rapport au PIB de référence pour les régions Canada, CEI et Moyen-Orient, scénario 550 ppm CO2-éq

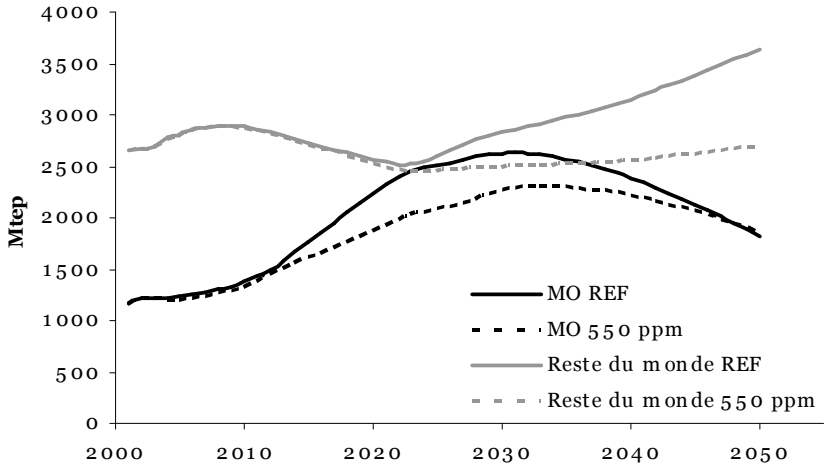


Figure 64 : Evolutions des productions de pétrole au Moyen-Orient et dans le reste du Monde, scénario de référence et scénario 550 ppm

- Dans le scénario 450 ppm, la maîtrise de la demande est telle que le Moyen-Orient ne parvient plus à réguler le marché à 70 dollars par baril. Pour tenter de limiter ses pertes, il court après les consommateurs en faisant baisser les prix progressivement dès 2020 (Figure 66). Il mène en quelque sorte une guerre des prix à l'encontre des politiques climatiques. Il faut garder à l'esprit qu'une variation de 10 $ par baril correspond grossièrement à une taxe de 90 $ par tonne de CO2, ce qui implique que cette guerre des prix a un sens, elle peut être efficacement menée avec les marges de profitabilité du Moyen-Orient.

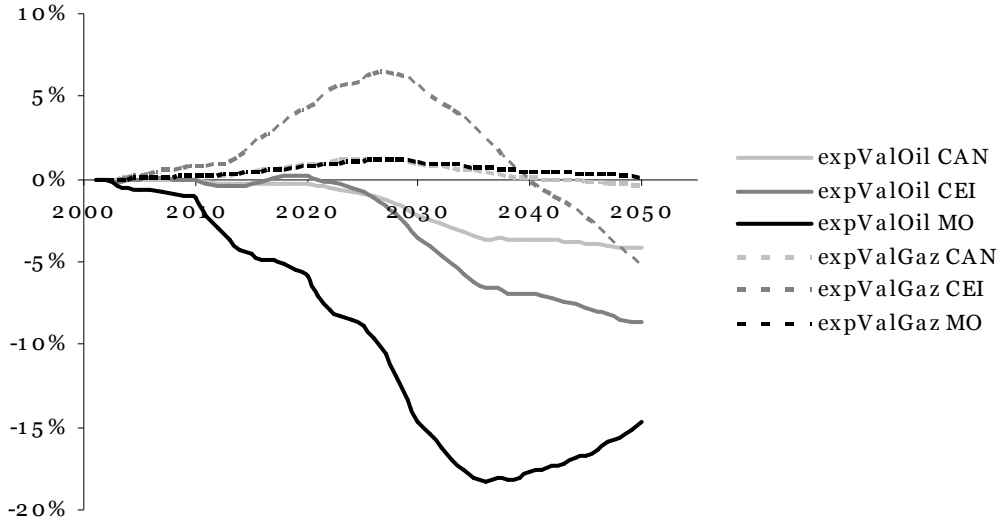


Figure 65 : Ratio des variations des exportations de pétrole et gaz en valeurs par rapport au PIB de référence pour les régions Canada, CEI et Moyen-Orient, scénario 450 ppm CO2-éq

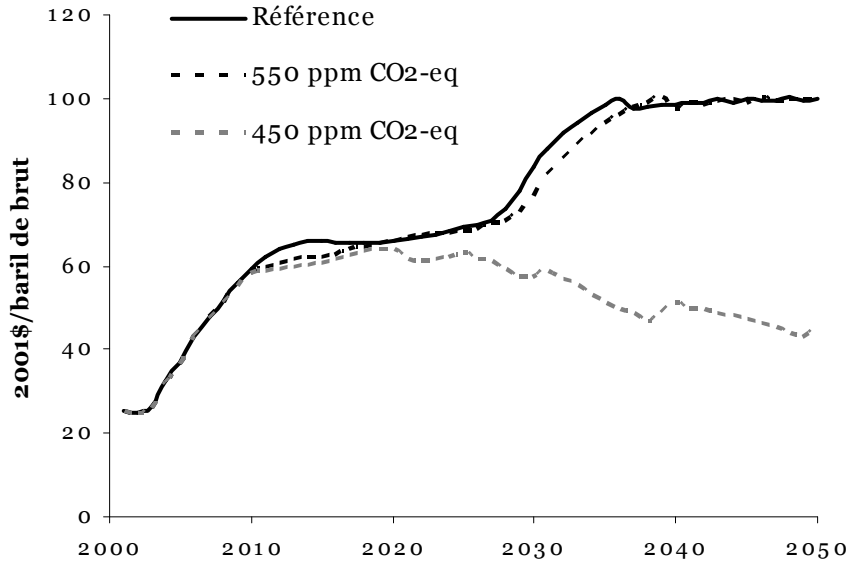


Figure 66 : Prix international du pétrole, scénarios Référence, 550 ppm CO2-eq, 450 ppm CO2-eq

Il est clair que les résultats exposés ici sont très dépendants des hypothèses prises sur le comportement stratégique du Moyen-Orient. Il est tout aussi clair que les capacités de contrôle du marché du Moyen-Orient s'amoindriront probablement au cours du demi-siècle et que le marché des hydrocarbures risque d'être piloté par plusieurs acteurs, dont la CEI et les producteurs de pétroles non conventionnels. La représentation contenue dans cette version du modèle inclut effectivement la réduction du pouvoir de marché du Moyen-Orient, dès que les contraintes physiques de rythme de production y deviennent effectives. Mais nous ne prenons pas en compte la montée en puissance du pouvoir de marché d'autres acteurs majeurs comme la CEI.

Pour finir, on peut noter que la région « Reste de l'Amérique Latine » subit un profil de perte similaire à celui du Canada, ce qui est principalement dû au manque à gagner des exportations de

pétroles non conventionnels du Venezuela. Cette dynamique masque en fait une disparité très grande selon les pays internes à cette région, dont la majorité auraient plutôt à subir un profil de pertes « en creux » comme la Chine et l'Inde, signe caractéristique d'un coût de transition vers une société peu intense en carbone.

3 Conclusion

Nous avons débuté ce chapitre en souhaitant initier un mouvement de réévaluation des politiques climatiques, à partir des innovations – qualifiées parfois d'*hétérodoxies* par rapport aux pratiques usuelles de l'économie du changement climatique – du modèle IMACLIM-R. Le défi intellectuel pourrait sembler à juste titre un peu trop ambitieux pour un seul chapitre de thèse, tout comme l'analyse des deux simulations réalisées pour ce chapitre pourrait alimenter encore quelques dizaines de pages. Nous nous proposons simplement ici de mettre en exergue quelques pistes de travail innovantes.

Premièrement, les profils du carbone générés par tâtonnement pour faire bifurquer l'économie mondiale sur une trajectoire de stabilisation des concentrations de GES donnent **un éclairage nouveau sur la question du profil du prix du carbone**. En théorie, les modèles de contrôle optimal, fondés sur le paradigme des anticipations parfaites, fournissent tous des profils de prix du carbone apparentés à des courbes exponentielles. L'introduction d'incertitude sur le climat, ou de surprises sur les coûts ou sur le climat, conduit à des profils plus complexes, « exponentiels par morceaux » mais toujours convexes ou convexes par morceaux. Dans les modèles récursifs, on obtient encore le même type de profil, parce que la demande d'énergie – voire la production d'énergie dans les modèles d'équilibre général – est représentée à travers des fonctions à élasticité constante sans inertie, et qui répondent donc efficacement à la montée progressive du prix du carbone. Dans IMACLIM-R, c'est l'introduction d'éléments de réalisme économique qui modifie complètement ce diagnostic sur le prix du carbone : l'interaction des anticipations limitées des agents économiques et de l'inertie des technologies et des équipements fait peser une contrainte de rythme sur les investissements de décarbonisation et exige un « signal » prix du carbone croissant rapidement au départ et pouvant éventuellement ralentir ensuite.

Bien sûr, l'intensité du signal prix qu'il est nécessaire d'afficher rapidement dans l'économie mondiale est sensible aux hypothèses technologiques, à l'élasticité de la demande, aux capacités de remplacement anticipé ou d'adaptation (*retrofitting*) du capital existant. Mais **l'idée maîtresse du profil concave est robuste aux incertitudes** sur ces paramètres : elle est liée à l'existence indubitable d'une forte inertie des usages, des infrastructures et des équipements industriels lourds et à l'horizon d'anticipation limité des agents économiques, fussent-ils des gouvernements ou des industriels éclairés sur le long terme.

Il y a un corollaire à cette idée maîtresse : nous soulignons **la nécessité d'une action précoce**. Le rythme de décarbonisation exigé par les enveloppes de trajectoires de stabilisation des GES à 550 ou 450 ppm CO2-equivalent, telles qu'elles ont été calculées dans un modèle de cycle du carbone, impose une action économique précoce dans l'ensemble du monde. La forme du profil du prix du carbone que nous avons révélé dans ce chapitre en est une démonstration par l'absurde : si ce profil était plus progressif et convexe, il serait impossible d'assurer les points de passage intermédiaires de l'enveloppe de réduction, sauf à rehausser très fortement la valeur du prix du carbone en 2050. D'un point de vue économique, l'action précoce est nécessaire parce que tout report des actions de décarbonisation de quelques années se traduit automatiquement par une « latence » (*lock-in*) plus grande des infrastructures, des équipements et des technologies intenses en carbone dans l'économie.

Deuxièmement, l'instauration d'**un prix universel du carbone**, sous la forme d'une taxe uniforme dans toutes les régions du monde, conduit à un bilan macroéconomique lourd, à cause de **coûts de transition élevés**, en particulier dans les pays émergents. Ces coûts de transition sont essentiellement dus à la simultanéité d'une croissance forte du signal prix du carbone dans tous les secteurs de l'économie et de l'inertie des technologies et des usages intensifs en carbone. Ils sont les plus élevés dans les économies dont l'intensité carbone est très élevée en début de période : CEI, Chine et Inde. Le profil de ces coûts de transition est général à toutes les régions, mais l'ampleur du ralentissement de croissance lié au fardeau de la taxe carbone est très variable selon les régions. Par ailleurs, il faut « superposer » par-dessus ces pertes transitoires l'impact macroéconomique des profondes modifications des échanges commerciaux de ressources fossiles, notamment sur les marchés du pétrole et du gaz. C'est là un résultat bien connu dans les travaux de modélisation déjà publiés dans la littérature (GIEC, 2007, WGIII, SPM §9 p.12) : le Moyen-Orient, la CEI[116], le Canada et le Venezuela subiraient un manque à gagner très significatif du fait des réductions de demande induites par les politiques climatiques.

L'ampleur de ces pertes de PIB nous empêche de n'y voir que des coûts « virtuels » par rapport à un scénario de référence qui, de toute façon, ne se réalisera pas si une politique climatique est en place. Il s'agit d'un vrai ralentissement de croissance perceptible, lié à un fardeau énergétique croissant dans le temps sous l'effet de la taxe carbone. Cela représente des coûts de transition inacceptables par les pays concernés, en particulier au regard des « responsabilités communes mais différenciées » du changement climatique. Sans surprise, nos simulations viennent appuyer le fait reconnu qu'un système de taxation uniforme ne peut être équitable sans transferts de compensation. Néanmoins les transferts de compensation qui seraient nécessaires pour pallier les effets de ralentissement mis en évidence dans ce chapitre seraient d'une telle ampleur qu'ils se heurteraient à de graves déséquilibres macroéconomiques.

Ces observations méritent d'être renforcées par une série de tests de robustesse vis-à-vis des incertitudes sur les « ingrédients » macroéconomiques et technologiques des scénarios, mais elles incitent déjà à rediscuter en profondeur les principes fondateurs du régime international de coordination des politiques climatiques. Il apparaît que le paradigme d'une « grande architecture » instaurant un prix universel du carbone croissant progressivement est fragilisé par ces simulations. Les résultats obtenus montrent qu'un tel régime à de fortes chances d'être inacceptable par de nombreux pays, dont les pays émergents et les pays producteurs d'énergies fossiles, et donc d'être inefficace dans la lutte concertée contre le changement climatique. Il faut pousser plus loin notre recherche d'un système sécurisant à la fois l'ampleur des coûts – puisque les travaux du GIEC laissent croire qu'il est *possible* de stabiliser les émissions à un coût très raisonnable – et le rythme des réductions pour ne pas dépasser les niveaux de concentrations jugés dangereux. Le chapitre suivant s'attachera donc à explorer les possibilités d'aménagement, de compensations ou de diversification des outils de régulation, afin de favoriser l'émergence d'un régime acceptable, permettant une transition efficace de l'économie mondiale vers des trajectoires peu intensives en carbone, à un coût minimal.

[116] La CEI bénéficierait dans un premier temps d'un report important sur le gaz comme combustible de transition mais, *in fine*, se retrouverait dans la même situation de manque à gagner que les autres producteurs d'énergie fossile.

Références

Böhringer, C., Löschel, A., 2005, “,Climate Policy Beyond Kyoto: Quo Vadis? A Computable General Equilibrium Analysis Based on Expert Judgments”, *Kyklos*, 58(4), 467-493

De la Chesnaye, F., Weyant, J., (eds), 2006, “Multi-Greenhouse Gas Mitigation and Climate Policy”, *The Energy Journal*, Special Issue, 2006

Edenhofer, O., Carraro, C., Koehler, J., Grubb, M. (eds) (2006): Endogenous Technological Change and the Economics of Atmospheric Stabilisation. A Special Issue of The Energy Journal, Vol. 27, International Association of Energy Economics, USA.

Foxon, T. J., Gross, R., Chase, A., Howes, J., Arnall, A., Anderson, D., 2005, “UK innovation systems for new and renewable energy technologies: Drivers, barriers and systems failures”, *Energy Policy*, 33(16), 2123–2137

Ha Duong, M, Grubb, M.J., Hourcade. J.-C., 1997, “Influence of socioeconomic inertia and uncertainty on optimal CO2-emission abatement”. *Nature*, 390, 270-274

Hallegatte, S., 2007, “Do current assessments underestimate future damages from climate change?”, *World Economics*, 8, 131–146.

Hogan, W. W., Manne, A.S., 1977, “Energy-Economy lnteractions: The Fable of the Elephant and the Rabbit”, in C. J. Hitch (Ed.), *Modelling Energy-Economy lnteractions: Five Approaches*, Resources for the Future, Washington D.C.

Hourcade, J.C., 2002, “Dans le labyrinthe de verre. La négociation sur l'effet de serre”, *Critique Internationale*, Fondation Nationale des Sciences Politiques, avril, 143-159

Jacoby, H.D., Schmalensee, R., Wing, I. S., 1999, “Toward a Useful Architecture for Climate Change Negotiations”, MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, Cambridge, MA

Lovins, A.B., LH. Lovins, F. Krause, W. Bach, 1981, *Energy Strategies for Low Climate Risk*. Report for the German Federal Environmental Agency, International Proiect for Soft-Energy Paths, San Francisco, CA, USA

MIES, 2004, “La division par 4 des émissions de dioxyde de carbone en France d’ici 2050, Introduction au débat”, Rapport rédigé par Pierre Radanne pour la Mission interministérielle de l’effet de serre, 40 p.

Pacala, S., Socolow, R., 2004, "Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the next 50 Years with Current Technologies", *Science*, 305(5686), 968 – 972

Philibert, C., Pershing, J., 2001, “Considering the options: Climate targets for all countries”, *Climate Policy*, 1(2)

Pizer, W. A., 1997, “Prices vs Quantities Revisited: the Case of Climate Change”, RFF Discussion Paper 98-02, Resources for the Future, Washington D.C.

Roberts, M., Spence, M., 1976, “Effluent charges and licenses under uncertainty”, *Journal of Public Economics*, 5, 193-208

Stavins, R., 1997, “Policy Instruments for Climate Change: How Can National Governments Address a Global Problem?”, Discussion Papers dp-97-11, Resources For the Future

Stern, N. H., 2006, “*The Economics of Climate Change: The Stern Review*”, Great Britain Treasury, Cambridge University Press, 2007, 692 pp.

Van Vuuren, D. P., Den Elzen, M. G., Berk, M. M., Lucas, P. L., Eickhout, B., Eerens, H. Oostenrijk, R., 2003, “Regional costs and benefits of alternative post-Kyoto climate regimes”, National Institute for Public Health and the Environment, Bilthoven, The Netherlands

Weitzman, M., 1974, “Prices vs Quantities”, Review of Economic Studies, 41(4), 477-491

Weyant, J.P., Hill, J.N., 1999, “Introduction and Overview”, *The Energy Journal*, Special Issue: The Costs of the Kyoto Protocol: A Multi-Model Evaluation, pp. vii-xliv

Chapitre 7

Futur régime de coordination des efforts : Quel compromis institutionnel entre vulgate économique et aspérités du monde réel ?

‘The politically charged rhetoric within which the climate change question is discussed means that anyone who questions the levels of percentage reduction goals, or expresses doubt about their feasibility or the structures and methods offered to achieve them is regarded with suspicion. Unquestioning support for massive and immediate reductions of emissions under the Kyoto type of approach has become a litmus test for determining who takes the threat of climate change seriously. In a new Manichean Heresy, individuals, institutions and nations who promote Kyoto are blessed. But those who doubt it, for whatever reason, are damned and lumped together as heretics.’ (G. Prins et S. Rayner, 2007, p.4)

Le travail de modélisation qui sous-tend l'ensemble de cette thèse est pris en ciseau entre deux temporalités très différentes. Globalement, il s'inscrit dans un effort de recherche continu au CIRED visant à repenser profondément la modélisation énergie-économie-environnement sur le long terme. Mais au moment précis de la rédaction de cette thèse, il devient aussi pertinent pour éclairer la problématique brûlante du régime de coordination post-Kyoto, régime qui doit être défini et négocié d'ici la fin 2009. Cette double temporalité se retrouve dans la portée de ce chapitre : les enjeux qu'il aborde relèvent à la fois d'une réflexion générale sur les instruments de transition vers des trajectoires de croissance peu intenses en carbone et d'un éclairage sur les négociations en cours pour déterminer le régime post-Kyoto.

Les débats sur le régime de coordination des efforts de lutte contre le changement climatique se développent dans un large espace, balisé d'un côté par l**es préconisations compactes de la théorie économique dans un monde de premier rang** – croissance à taux constant du prix du carbone, unicité du prix du carbone pour minimiser les coûts totaux, séparabilité entre équité et efficacité – et rendu extrêmement complexe par **l'hétérogénéité complexe du monde réel** – divergences d'intérêts, politiques domestiques préexistantes, inertie voire irréversibilité des choix techniques dans certains secteurs, effets de système. Le Protocole de Kyoto apparaît bien comme le résultat d'un jeu d'équilibre entre ces deux contraintes : d'une part le choix de l'outil des quotas échangeables procède directement des préconisations théoriques pour un régime de coordination *efficace* fondé sur l'égalisation des coûts marginaux, d'autre part le régime est ajusté tant bien que mal à l'hétérogénéité du monde réel avec de multiples aménagements : limitation du régime contraignant à l'Annexe I, dotation d'air chaud à la Russie et à l'Ukraine, maintien de la souveraineté sur les politiques et mesures internes aux Parties, etc.

Dans le chapitre précédent, nous avons mis en scène cette dualité, en soumettant IMACLIM-R, un modèle de simulation qui représente partiellement l'hétérogénéité *économique* et les sous-optimalités du monde réel, à la préconisation principale de la théorie économique : un signal prix unique. Cette expérience nous a conduit à identifier les limites possibles de cette préconisation :

(i) l'existence de fortes inerties et de capacités limitées d'anticipation peuvent justifier un profil de prix du carbone augmentant rapidement pour provoquer la transition vers un sentier peu intenses en carbone – un profil « plus concave » que le profil exponentiel théorique « à la Hotelling » ;

(ii) ce profil appliqué uniformément risque de générer des coûts de transition rédhibitoires, surtout s'il est relayé intégralement dans les économies en développement.

Dès lors que l'on reconnaît que le paradigme théorique du prix unique peut poser problème dans le monde réel – ce qui n'est pas contradictoire avec la démonstration de sa supériorité dans un monde théorique simplifié – il faut s'appliquer à chercher des aménagements qui puissent en faire un système performant ou à trouver d'autres systèmes plus satisfaisantes. Ce chapitre vise précisément à explorer cet espace de recherche.

La première partie présente un examen des aménagements possibles du système du prix unique susceptibles de le rendre équitable et/ou acceptable. La première piste est celle qui est suggérée par l'hypothèse de séparabilité entre équité et efficacité sous-jacente à la préconisation du prix unique : l'équité du système doit être garantie par l'allocation initiale des droits. La seconde piste, qui relève aussi des transferts de compensation, consiste à exploiter le large gisement de politiques et mesures ouvert par le recyclage des recettes de la taxe prélevée sur les émissions de GES.

La seconde partie pose la question d'un abandon du principe du prix unique, en étudiant la justification théorique de la différentiation des prix avant de l'expérimenter dans le modèle IMACLIM-R. L'abandon de l'unicité du prix unique libère de nombreux degrés de liberté, parmi lesquels nous distinguons différentiation régionale et différentiation sectorielle.

Enfin, une troisième partie proposera un pas de côté, en replaçant le signal-prix du carbone dans un éventail d'outils de régulation et de coordination plus large, pour une compréhension plus globale des moyens de bifurcation vers des trajectoires de croissance peu intensives en carbone. L'argument consiste à souligner le rôle des politiques d'infrastructures qui, si elles ne répondent guère au niveau du signal prix du carbone, peuvent contribuer significativement aux réductions d'émissions sur le long terme.

1 Quelles compensations pour un prix unique acceptable ?

1.1 Transferts internationaux et redistribution infra-nationale

L'égalisation des coûts marginaux de réduction d'émissions est synonyme de minimisation des coûts totaux de réduction lorsque tous les agents économiques sont rationnels. Cette minimisation des coûts techniques peut être à son tour synonyme de maximisation du bien-être social à condition que l'on puisse procéder à des transferts de compensation entre agents sans détériorer l'efficacité du système : c'est l'hypothèse bien connue en économie de séparabilité entre équité et efficacité. Les transferts nécessaires pour atteindre l'optimum collectif dépendent de la forme choisie pour la fonction de bien-être social et du poids de chaque agent dans cette fonction, deux éléments qui sont du registre de l'équité car ils nécessitent un jugement de valeur sur ce qui est *juste*. Face à la situation de fortes disparités des coûts macroéconomiques que nous avons identifiée dans le chapitre précédent, le « réflexe » de l'économiste sera, après vérification que l'égalisation des coûts marginaux est garantie, de renvoyer à la sphère politique le rôle de négocier des transferts compensatoires qui rendent le système acceptable, entre les régions et à l'intérieur des régions. Mais il faut bien distinguer, dans la négociation internationale, ce qui peut relever d'un accord international et ce qui restera toujours du domaine de souveraineté des états :

- Dans la première catégorie, les représentants des Parties auprès de la Convention Climat peuvent en effet négocier des compensations entre états, pour se répartir la charge de la lutte contre le changement climatique d'une manière qui leur semble équitable, notamment en considérant les « responsabilités communes mais différenciées » des pays dans le changement climatique présent et futur. Dans le cas d'une taxe internationale, il faudrait négocier des flux financiers directs pour réallouer le fardeau. Dans le cas d'un système de quotas échangeables, les transferts peuvent avoir lieu de manière indirecte à travers les échanges de quotas, qui dépendent directement de leur allocation initiale. La négociation va donc porter sur les règles d'allocation de quotas, avec en filigrane les transferts monétaires potentiels qu'elles devraient induire.

- Dans la seconde catégorie, les Etats eux-mêmes ont toute latitude d'accompagner toute politique de réduction des émissions de mesures de compensations pour préserver l'équité nationale. Dans le cas d'une taxe uniforme sur les émissions, le recyclage des revenus de la taxe fournit un levier important de transferts entre agents économiques. Dans le cas de quotas échangeables au niveau international, il faudra de même réallouer la charge ou le bénéfice des transferts respectivement émis ou reçus.

Nous allons examiner successivement ces deux catégories de compensations au regard des négociations présentes et passées, de la littérature économique abondante sur ces sujets et des simulations d'IMACLIM-R.

1.2 Règle d'allocation des quotas : Un compromis impossible ?

La souplesse du mode d'allocation initiale des quotas est en général présentée comme un degré de liberté permettant de rendre progressivement acceptable par les pays en développement l'entrée dans un régime de quotas contraignants, en faisant apparaître la possibilité de transferts de revenus conséquents, permis par la vente de quotas excédentaires. L'élargissement est nécessaire pour améliorer tant l'efficacité environnementale du régime, puisqu'elle permet la maîtrise d'une plus grande part des émissions mondiales, que l'efficience économique, puisque l'élargissement du marché de quotas ne peut être en théorie que bénéfique pour la collectivité mondiale, à contrainte d'émissions globale donnée. La minimisation des coûts reste garantie par la mise en place d'un marché concurrentiel des quotas, et la question de l'équité est traitée séparément dans l'allocation initiale des quotas[117].

D'un point de vue pragmatique, le libre choix de l'allocation initiale des quotas est pourtant un outil à double tranchant : s'il ouvre un espace possible de négociation pour élargir le régime de coordination, sa faiblesse majeure, en général sous-estimée, est aussi précisément qu'il *impose* de négocier cette allocation sous l'angle de l'équité. Or les transferts financiers potentiels dans un régime mondial de quotas échangeables donnent aux arguments sur l'équité une portée implicite considérable en matière économique. Le registre argumentaire de l'équité peut alors être utilisé stratégiquement, comme une source de pouvoir de veto et de négociation pour les pays s'estimant traités d'une manière inéquitable ou comme un ensemble de repères flous pouvant justifier des comportements de poursuite de l'intérêt national, à moins d'être réduit à un guide de décision de second ordre pour les situations dans lesquels l'intérêt national n'est pas véritablement en jeu (Ringius et al., 2000). Un débat intense s'est développé autour des multiples propositions de règles d'allocation de quotas et des principes philosophiques pouvant permettre de définir une attribution convenable des quotas. Ces controverses sont rendues inextricables du fait du caractère « non opposable » de la plupart des arguments d'équité, L'inopérance de la référence à l'équité se retrouve au cœur du texte fondateur de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (UNFCCC, 1992), lorsque l'équité est mentionné de manière très large à deux niveaux :

- l'équité inter-générationnelle, qui est un des fondements de la convention, motivant les générations présentes à supporter des efforts au profit des générations suivantes ;
- l'équité intra-générationnelle, qui transparaît dans l'article 3.1, qui conditionne la répartition des efforts des Parties « sur la base de l'équité et en fonction de leurs responsabilités communes mais différenciées et de leurs capacités respectives », dans l'article 4.2.a, qui demande aux pays développés de « prendre l'initiative » dans la lutte contre le changement climatique, et dans l'article 3.2 qui exige de tenir compte des circonstances spécifiques des pays en développement les plus vulnérables.

La littérature économique fournit plusieurs tentatives de synthèse des controverses, qui aboutissent plus à un catalogue de taxonomies qu'à un véritable éclaircissement sur les termes du débat. Le troisième rapport du GIEC (2001) fournit par exemple une liste générale de 13 principes d'équité (

Tableau 33).

[117] Cette vision du problème sous-tend presque exclusivement le déroulement des négociations mais aussi les travaux des économistes, malgré des mises en garde claires et précoces sur son caractère simpliste, comme celle de G. Chichilnisky et G. Heal en 1994.

Principe d'équité	Interprétation
Égalitariste	Chaque individu possède un droit égal à polluer ou à être protégé de la pollution
Souveraineté	Toutes les nations ont un droit égal polluer ou à se protéger de la pollution : les émissions actuelles constituent un *statu quo*
Pollueur-payeur	Doit conduire à des pertes de bien-être correspondant aux gains dus aux émissions
Capacité à payer	Les coûts de réduction changent selon le niveau de revenu national
Horizontal	Les pays ayant des caractéristiques similaires supportent les mêmes contraintes ou ont les mêmes droits
Vertical	Les pertes de bien-être varient dans le même sens que la richesse nationale.
Utilitariste	Maximise le bien-être total
Compensation	La situation de tous doit s'améliorer ou rester la même
Maximin de Rawls	Maximise le bien-être du plus mal loti
Justice du marché	Le marché est un processus juste
Consensus	La négociation politique est un processus juste
Convergence	Égalise les émissions par tête
Environnemental	L'environnement est prioritaire
(source : Table 10.9 Equity principles and burden-sharing rules (IPCC, WG III, 2001))	

Tableau 33: classification des principes d'équité selon le 3ème rapport du GIEC

Blanchard et al. (2000) fournissent une autre présentation des références philosophiques de l'équité à partir de six repères de justice distributive utiles pour les critères d'attribution des quotas :

- *l'égalité des droits*, débouchant sur des allocations au pro rata de la population ;
- *l'égalité utilitariste*, c'est à dire l'égalité du poids de chacun dans la fonction d'utilité collective, qui débouche sur une égalisation des *pertes marginales de bien-être* des politiques climatiques ;
- *l'égalité démocratique*, selon laquelle les individus sont impartiaux et prennent leur décision sous le « voile d'ignorance ». Cela débouche, suivant le « principe de différence » de Rawls, sur la concentration des efforts vers l'amélioration du sort du plus défavorisé. Appliqué au changement climatique, ce principe revient à compenser la pauvreté des pays et leur vulnérabilité par une allocation plus généreuse et un report de la majorité des coûts sur les pays riches ;
- la *responsabilité causale*, qui égalise le pouvoir nocif de chaque tonne de polluant émise, et exige que chacun assume le coût de sa pollution : il s'agit en fait du principe pollueur-payeur, qui se concrétise par exemple avec des réductions proportionnelles aux émissions historiques cumulées ;
- le *mérite*, qui considère juste que l'effort soit récompensé, même s'il crée des inégalités de traitement (il s'agit d'une égalité de traitement de chacun au pro rata de ses résultats). Dans notre cas, cela exigerait des pays très peu efficaces d'un point de vue environnemental le plus d'efforts d'abattement ;
- l'*égalité proportionnelle*, qui, selon la philosophie aristotélicienne, justifie les inégalités par une différence de position sociale (qui sous-entend une valeur du travail individuel).Dans notre cas, cela peut être interprété en considérant juste la situation actuelle et en favorisant le *statu quo*, par une allocation au prorata des droits d'émissions « acquis ».

Cette seconde présentation est éclairante pour montrer que *l'égalité* est un argument de justice très malléable, car toute notion de justice peut être vue comme l'égalité de tous d'un point de vue particulier, la controverse portant alors sur la variable qu'il s'agit d'égaliser (Sen, 1992). Cela donne un éclairage sur l'insolubilité du débat éthique posé par le changement climatique : au cœur du débat, la variable d'égalité elle-même ne fait pas consensus.

En fait ces deux taxonomies montrent que, malgré leur intérêt heuristique, elles sont très loin de pouvoir être traduites en règles opérationnelles. Par exemple, comment rendre opérationnel le concept de « négociation politique juste » ? Les principes d'égalitarisme et de convergence ne correspondent-ils pas à la même idée, simplement différée dans le temps dans le cas de la convergence ? Comment traduire le « mérite » ?

Un certain nombre de règles d'allocation ont été proposées en invoquant les multiples référentiels de l'équité. Comme un certain nombre d'auteurs (par exemple Reiner et Jacoby, 1997 ; Ringius et al., 1998), nous avons pris acte de la multiplicité des conceptions de l'équité et avons pris le parti de proposer une analyse pragmatique et technique des règles d'allocation (Lecocq et Crassous, 2002). D'une manière très générale, la définition d'une règle d'allocation de quotas complète comprend les deux éléments suivants : (i) une règle de participation et d'exemption qui désigne pour chaque période d'engagement le sous-ensemble des pays qui prennent des engagements contraignants, (ii) une règle d'attribution des quotas aux pays engagés, à partir de variables observables (PIB, population, performance énergétique, etc.) et de paramètres à négocier (taux de réduction, pondération des critères, année de référence, etc.).

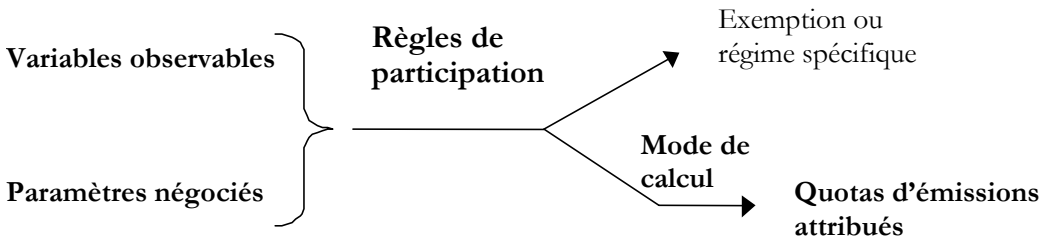


Figure 67 : forme générique d'une règle d'allocation de quotas (Lecocq et Crassous, 2002)

Concernant la règle d'exemption, Ringius et al. (2000) ont proposé une analyse claire de la justification d'un régime d'exemption en délimitant la place de l'argumentaire de l'équité au sein de trois situations possibles d'hétérogénéité entre les protagonistes (Figure 68) :

- au sein d'un sous-ensemble d'acteurs peu différents, l'égalité de traitement s'impose de façon naturelle comme la seule issue pragmatiquement viable, mais il reste à négocier la variable d'égalité ;
- dans un ensemble très hétérogène où certaines catégories d'acteurs sont largement défavorisées par rapport à la moyenne, l'exemption prévaut pour ces acteurs tant qu'ils restent dans une situation très dégradée ;
- dans un ensemble d'hétérogénéité intermédiaire, la référence explicite à l'équité devient opérationnellement nécessaire pour différencier les engagements, avec une prise en compte difficilement contestable des notions de *responsabilité*, de *capacité* et de *besoin*.

Ce découpage est assez opérationnel pour décrypter le régime climatique actuel et la construction d'un régime futur. Dans le régime actuel, les PED sont exemptés tandis qu'au sein de l'annexe I, l'égalité a été le point de départ avec un taux unique de réduction par rapport aux émissions de 1990, puis les différences de situations nationales ont justifié un recours à une différentiation des

engagements, même si la différentiation actuelle des taux de réduction dans la protocole de Kyoto est le résultat d'une négociation plus que d'une règle de partage équitable (excepté pour la bulle européenne ayant adoptée *l'approche du triptyque*, décrite plus bas).

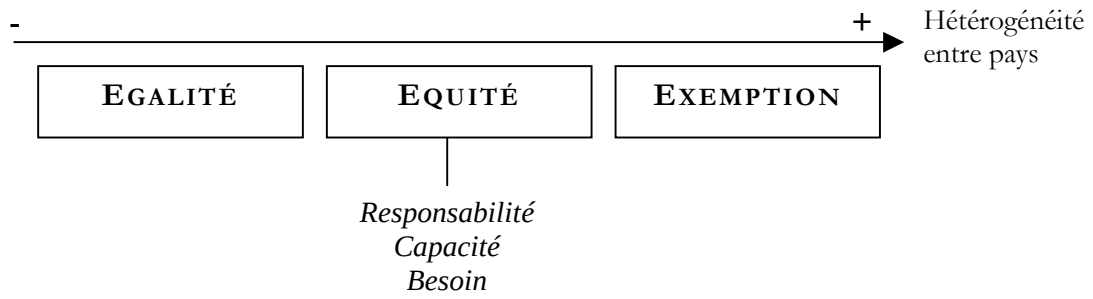


Figure 68 : Mise en perspective des régimes d'exemption, d'équité et d'égalité (Ringius et al, 2000)

Dans chaque règle d'allocation, un calcul plus ou moins complexe permet ensuite de déterminer les volumes d'émissions de chaque pays. Le spectre des formules utilisées est extrêmement large, depuis un taux de réduction uniforme ou différencié par rapport à une référence historique (grand-fathering) jusqu'à un modèle climatique complet pour calculer les responsabilités passées (proposition brésilienne). La complexité des formules et leur sensibilité aux paramètres négociés peut constituer un réel obstacle pour les négociations. Le Tableau 34 dresse un récapitulatif des familles de règles proposées lors du mandat de Berlin ou dans la littérature et de leurs caractéristiques techniques. Il rend compte de la complexité de l'objet de négociation que peut être une règle d'allocation de quotas, une complexité qui rend forcément *spéculative* toute estimation *ex ante* des coûts finaux qu'implique telle ou telle règle d'allocation, et ce d'autant plus que, pour chaque Partie, cette estimation dépendra non seulement de son propre quota, mais aussi du périmètre du régime et de la quantité totale de quotas alloués, qui conditionnera l'état du marché et le niveau du prix du carbone.

Si la négociation sur le post-Kyoto se poursuivait dans le sens d'un système des quotas élargi, cela reposerait donc sur le pari qu'un compromis est possible autour d'une règle d'exemption et d'allocation des quotas, avec, pour les nouveaux entrants, une allocation initiale suffisamment incitative, c'est-à-dire qui devrait garantir des coûts nets faibles voire des bénéfices (transferts importants pour le Sud en échange d'une baisse des coûts de réduction au Nord). Ce pari est rendu très hypothétique par l'insolubilité du débat sur l'équité, la multiplicité des règles et leurs justifications concurrentes. D'un côté, le choix d'une formule de « grandfathering » pour l'allocation des permis n'est pas tenable vis-à-vis des pays en développement ; de l'autre, l'hypothèse d'une convergence à terme des droits alloués par individu deviendra inacceptable lorsque la convergence commencera effectivement (cf. §2.2.3 dans le chapitre 6). Les règles technico-économiques représentent une vraie piste de travail, du fait qu'elles tiennent compte de l'hétérogénéité des pays, de la composition de leur économie, de leurs performances énergétiques et de leurs perspectives de croissance future, sortant ainsi de la pure rhétorique de l'équité et se concentrant sur la faisabilité technico-économique des réductions dans les différents pays.

Tableau 34 : Synthèse des principales règles d'allocation proposées dans la littérature

Règle	Référence	Variables observables	Formule	Paramètres	Transition
Grand-fathering	SO2 aux USA ; Protocole de Kyoto	Émissions de référence	Taux de réduction uniforme	Année de référence + taux de réduction	Seuils ou taux différentiés.
Responsabilités historiques	Proposition du Brésil, den Elzen et al. 1999	Émissions historiques	Modèle climatique + réductions proportionnelles à la responsabilité	Amplitude de la comptabilité passée + paramètres du modèle + enveloppe	Aucune dans la proposition, seuils dans l'analyse RIVM.
Règle d'Agarwal	Agarwal et Narain, 1991	Population	Quotas proportionnels à la population	Niveau d'émissions par tête	Aucune
C&C	Global Commons Institute	Émissions de référence et population	Convergence progressive vers un niveau uniforme d'émissions par tête	Année et niveau de convergence + année de référence.	Aucune
Règle de Jacoby	Jacoby et al. 1999 ; propositions de la Pologne 1997, Russie 1995, Corée du sud 1997	Bien-être individuel, ou PIB par tête	Taux de réduction croissant avec la richesse par tête	4 paramètres interprétables.	Aucune
Multi-critères	Propositions Norvège 1996, Australie 1997, Islande 1997 ; Ringius et al. 1998	Nombreuses possibilités : Émissions par tête, PIB par tête, intensité énergétique, croissance du PIB...	Somme pondérée de critères normalisés	Pondération des critères + paramètre d'échelle	Aucune
Menu	Propositions du Japon 1996 et 1997 ; Claussen et McNeilly, 1998	Emissions par unité de PIB, émissions par tête	Libre choix ou conditions.	Conditions de sélection des options.	Options spécifiques pour les PED.
Egalisation des coûts marginaux	Proposition de l'Australie 1996	Courbes de coût marginal	Égalisation des coûts marginaux	Prix du carbone	Seuil nécessaire
Bottom-up	Phylipsen et al. 1998 ; Groenenberg et al. 2000; Jansen et al., 2001	Description des économies nationales	Sous-règles sectorielles + Somme des réductions sectorielles	Paramètres des sous-règles, hypothèses futures.	Seuil et période d'ajustement.

Nos précédentes simulations ont montré qu'un système de taxation uniforme comportait le risque de disparités très larges dans le bilan macroéconomique des régions et nécessiterait donc de larges compensations pour rendre ce système possible à négocier avec les Parties à la Convention Climat. Supposons qu'un consensus puisse être trouvé si on s'accorde sur le fait de ramener les pertes de chaque région au même niveau que les pertes mondiales en % des PIB nationaux. Si on se place dans le scénario 450 ppm CO2-eq et directement en 2025, au creux de la transition, le différentiel de pertes par rapport au monde (qui marque un ralentissement global de 8%) est de 15% pour l'Inde (-24% de PIB), 25% pour la Chine (-33% de PIB), 16% pour le Moyen-orient (-24% de PIB). Ce calcul est certes trompeur, puisqu'en commençant à injecter des transferts dans les économies les plus en affectées par la transition dès 2010, on parviendrait à éviter l'effet dynamique d'accumulation de retard de croissance, et l'on n'aurait pas besoin de compenser, à chaque date, le montant total de la différence entre les deux scénarios. Mais cela signifie tout de même que les transferts échelonnés entre 2010 et 2025 devront être suffisants pour générer 15% du PIB de l'Inde et 5 % de celle de la Chine en 2025. A l'heure où les pays développés consentent difficilement à consacrer 0.5% de leur PIB à l'aide au développement, il est peu probable qu'une négociation autour de tels transferts soit envisageable.

Par ailleurs des niveaux de transferts élevés, même bien en deçà des montants mentionnés ci-dessus, génèrent des problèmes institutionnels et macroéconomiques. Comme cela a été observé dans l'histoire de l'aide au développement ou dans le cas des pays bénéficiant de très larges revenus d'exportations, l'existence de flux monétaires massifs et concentrés est fortement susceptible de donner lieu à des pratiques de corruption, de détournement et d'utilisation inefficace pour la croissance des pays concernés. Enfin, le déséquilibre induit par des flux importants sur la balance des paiements et la variation des termes de l'échange peuvent être très préjudiciables au dynamisme économique des pays bénéficiaires des transferts. Ce risque de « Dutch disease » a déjà été mentionné par McKibbin et Wilcoxen (1998), avec une illustration quantitative réalisée grâce au modèle G-Cubed, un modèle d'équilibre général représentant en détail les mécanismes de flux de capitaux.[118]

Il est donc peu probable que l'allocation initiale des quotas ou la mise en place de transferts de compensation directs ne puisse résoudre les difficultés identifiées dans les scénarios du chapitre précédent. La seconde piste d'investigation concerne les possibilités de redistribution internes aux pays eux-mêmes.

1.3 Effet levier du recyclage des revenus « carbone »

Une taxe carbone ou un système de quotas échangeables, lorsqu'ils sont vendus aux enchères, génère une masse considérable de revenus pour le régulateur. Dans le scénario 550 ppm CO2-eq par exemple, les revenus de la taxe s'élèvent à 2% du PIB aux Etats-Unis, 1.6 % en Europe, 8.3% en Chine, 6.3% en Inde et au Brésil. Dans le scénario 450 ppm CO2-eq, ces revenus atteignent 5% dans l'OCDE et jusqu'à 30% en Chine (en 2030). Le mode de recyclage domestique de ces revenus peut avoir un impact important sur l'ampleur des coûts des politiques domestiques. En effet, il existe dans l'économie des prélèvements jugés pénalisants – par exemple il créent des distorsions dans l'activité économique en modifiant les prix des facteurs de productions, ce qui éloigne l'économie de l'optimum de production – mais justifiés par des besoins de financement de l'état ou par une volonté de

[118] Mais discuter ce type d'effet de système, c'est déjà remettre en cause l'hypothèse de séparabilité entre équité et efficacité, puisque les transferts de redistribution auraient ici un impact sur le coût global et il ne deviendrait plus évident qu'il existe toujours un jeu de transferts compensatoires pour satisfaire à n'importe quelle répartition du fardeau.

redistribution. En substituant les revenus de la politique climatique à ces prélèvements pénalisants, il est possible de stimuler l'économie en relâchant des contraintes qui bridaient l'emploi, l'investissement et la croissance. C'est dans ce contexte qu'a été largement discutée l'hypothèse du double dividende des politiques climatiques (Ghersi, 2003)

Pour illustrer cette question, nous avons recalculé le scénario 450 ppm avec la même taxe carbone mais en diminuant les prélèvements sur le travail, en maintenant le budget de l'état au même niveau que dans le scénario de référence grâce aux revenus de substitution, au lieu d'un transfert direct du revenu de la taxe aux ménages comme dans le chapitre précédent. Le Tableau 35 permet d'évaluer l'effet de ce mode de recyclage sur les pertes actualisées de PIB : pour tous les pays de l'OCDE, le Brésil et le reste de l'Asie, le bilan net des politiques climatiques devient positif, tandis que pour la Chine ou l'Inde le bilan est quasiment inchangé dans le nouveau scénario. L'effet d'un tel recyclage sur les pays apparaît aussi hétérogène que les situations régionales, car il dépend des structures fiscales préexistantes et du jeu des facteurs limitant la croissance le long de la trajectoire : en Chine, la quasi nullité des prélèvements sur le travail dans les données de calibrage (GTAP, 2001) fait que le coût du facteur travail n'est guère limitant pour la croissance par rapport aux contraintes de financement ou d'inertie du changement technique et que ce recyclage n'existe pas.

Tableau 35 : Pertes actualisées de PIB réel (PPA) par rapport au scénario de référence sur la période 2010-2050, scénario 450 ppm CO2-eq avec deux modes de recyclage

	Recyclage transferts aux ménages (Ch. 6)	Recyclage sur les charges sociales
USA	-0.6%	**4.4%**
Canada	-4.3%	**0.8%**
Europe	-0.5%	**9.3%**
OCDE Pacifique	-0.5%	**4.5%**
CEI	-14.0%	-10.4%
Chine	-18.6%	-18.2%
Inde	-6.1%	-6.3%
Brésil	-0.7%	**6.1%**
Moyen-Orient	-25.1%	-21.8%
Afrique	-2.4%	-1.0%
Reste Asie	-1.0%	**0.2%**
Reste Am Lat	-4.3%	-1.7%

Dans la mesure où il peut stimuler la croissance, un tel recyclage risque aussi de diminuer le résultat environnemental de la politique, à cause d'éventuels effets rebonds. Par exemple, si les industries de production de matériaux très intensives en énergies fossiles (acier et ciment par exemple) bénéficiaient d'une rétrocession d'une partie du revenu de la taxe afin d'éviter une trop forte hausse du coût des matériaux dans une phase d'industrialisation intensive (par exemple en Chine), cette rétrocession, même si elle est indépendante des efforts d'abattement réalisés pour ne pas distordre l'équimarginalité visée, conduirait à soutenir l'activité industrielle émettrice et créerait ainsi donc une rétroaction positive sur la quantité d'émissions de cette activité. Il faut alors arbitrer entre les bénéfices économiques globaux de ce mode de recyclage avec soutien à l'industrie et le surcoût éventuel de l'effet rebonds sur les émissions industrielles. Cet arbitrage est analogue aux choix d'allocation initiale gratuite des quotas dans un système de quotas échangeables.

Dans notre scénario, l'effet rebonds du surplus de croissance permis par le second mode de recyclage n'est pas négligeable puisque les émissions mondiales cumulées de 2005 à 2050 sont supérieures de 38 GtCO2 dans le second scénario soit 4% d'augmentation du budget carbone – de l'ordre de 10 à 15 ppm de CO_2 en plus dans l'atmosphère. Pour revenir à la même enveloppe d'émissions, il faudrait rehausser la taxe pour limiter la croissance d'activités polluantes mais cet accroissement de la taxe uniforme aurait pour effet de répartir sur l'ensemble des pays la charge des 4% de réduction supplémentaires et d'augmenter les pertes de transition déjà élevés des pays les plus pénalisés, tandis que ce sont les pays de l'OCDE qui bénéficieront d'un regain de croissance.

Les nombreuses possibilités de recyclage mériteraient une étude approfondie, propre à la situation fiscale et administrative de chaque pays. Ce seul exemple de recyclage alternatif permet déjà de souligner que le mode de recyclage choisi à l'intérieur de chaque pays est susceptible de modifier profondément le bilan macroéconomique des politiques climatiques. Cela constitue une marge de manœuvre supplémentaire pour le régulateur. La robustesse des résultats que nous obtenons devra encore être testée, parce qu'elle vient se heurter à une controverse historique dans la littérature, en particulier parce que l'effet du mode de recyclage est bien moindre dans la majorité des modèles qui ne comportent aucune sous-optimalité et très peu de rigidités (Ghersi, 2003).

Par ailleurs, étant donné que ce levier d'action reste d'une part très incertain, d'autre part purement domestique, il ne peut guère constituer un argument rassurant dans la négociation internationale. De nombreuses raisons politiques hors du champ énergétique ou climatique peuvent justifier que des décideurs maintiennent des politiques et mesures qui ont pour effet pervers de contraindre la croissance et il semble difficile de placer au cœur des négociations internationales une réforme générale des fiscalités ou des politiques infra-nationales. Le choix du mode de recyclage présente une marge de manœuvre supplémentaire pour lever d'autres contraintes hors du champ énergétique et générer ainsi un double dividende, mais nous restons toujours à la recherche d'un aménagement international du système du prix unique qui soit susceptible de limiter les risques de pertes trop importantes.

2 Quand équité et efficacité ne sont plus séparables : vers une différentiation des coûts marginaux

2.1 Pour un dialogue renouvelé entre vulgate économique et prise de décisions dans le monde réel

Face à la nécessité de mettre en place sans délai des politiques climatiques efficaces et les moins coûteuses possibles, les économistes doivent se résoudre à éclaircir les deux paradoxes qui se dégagent de la confrontation entre leurs résultats et le monde réel, à savoir d'une part l'opposition entre la préconisation théorique compacte d'un prix du carbone universel et l'hétérogénéité des situations et des mesures prises pour réduire les émissions, d'autre part le décalage entre les évaluations optimistes des coûts totaux de stabilisation des concentrations et la crainte généralisée des négociateurs vis-à-vis d'une facture trop importante. Cette déconnection tenace entre une vulgate économique aussi « épurée » que les modèles et les hypothèses qui la sous-tende et les hétérogénéités observables du monde réel nuit à une prise de décisions éclairée.

Il serait facile de solder ce dilemme en accusant les pouvoirs publics qui n'observent pas la préconisation pourtant simple du prix unique et ne veulent pas croire que cela conduirait à des coûts

totaux restreints à quelques pourcents de PIB en 2050, mais ce serait là un raccourci peu convaincant et surtout peu productif. Jusqu'à preuve du contraire, il existe certainement dans le monde réel, plus complexe que les projections agrégées et simplifiées que nous en faisons, des éléments de rationalité économique susceptibles de justifier l'hétérogénéité des mesures envisagées dans le monde réel et les craintes de coûts élevés des nécessaires réductions d'émissions. L'aide que l'économie fournit à la décision ne peut se cantonner à un exercice de *table rase* dans lequel se place habituellement la théorie économique, en résumant le monde réel à des courbes de coût marginal d'abattement. En quelque sorte, nous plaidons ici pour une « inversion de la charge de la preuve » : selon nous, celle-ci devrait incomber à ceux qui forment un jugement normatif à partir de modèles trop simples pour décrire l'hétérogénéité du monde réel, notamment via des hypothèses héroïques sur le fonctionnement de l'économie – agents représentatifs, anticipations parfaites, absence d'inertie, etc. L'économiste doit s'interroger sur la faiblesse de sa capacité de conviction vis-à-vis des décideurs, surtout s'il place quelque confiance dans la pertinence de son expertise pour la maîtrise des coûts des politiques publiques.

D'un point de vue scientifique, l'enjeu n'est pas de rejeter en bloc les approches théoriques et les dogmes de l'analyse économique classique, dans une sorte de querelle de chapelle à peine masquée. Comme dans le débat entre ingénieurs et économistes autour de l'existence des potentiels « sans-regrets » (cf. chapitre 2), l'enjeu de cette discussion est moins épistémologique qu'opérationnel : il s'agit de définir les politiques et mesures les plus adaptées à la question climatique.

Il faut reconnaître aux approches théoriques leur rôle heuristique essentiel : elles permettent de faire émerger les questions centrales – par exemple la recherche du tempo optimal des réductions, la prise en compte de l'incertitude, l'implication de l'existence d'un progrès technique *induit*, etc. – et de développer des approches normatives sur les politiques à mettre en œuvre. Elles débouchent en général sur des préconisations simples – prix unique, croissance de la valeur carbone au taux d'actualisation, séparabilité équité-efficacité – mais qui ne peuvent être dissociées des hypothèses souvent restrictives qui les sous-tendent. En général, ces préconisations servent d'ancrage aux discussions, notamment parce qu'elles ont l'avantage indéniable de la simplicité, mais cet ancrage comporte le risque récurrent d'une extrapolation abusive, lorsque la référence nécessaire aux hypothèses originelles est négligée. L'enjeu vital pour l'expertise économique est bien d'éviter cet écueil, en cherchant à élaborer des préconisations économiques qui soient *robustes* au non-respect des hypothèses restrictives des modèles dans un monde réel imparfait et hétérogène.

Nous avons amorcé un mouvement dans ce sens dans le chapitre 6, en passant les préconisations théoriques au crible d'un modèle empirique restituant une partie des imperfections et des hétérogénéités du monde réel. Cette expérience ne peut s'arrêter au pessimisme des résultats que nous avons obtenus jusque là. Il est maintenant indispensable de se libérer des préconisations du modèle théorique simple pour examiner ce qui peut se passer lorsque l'on abandonne ses hypothèses restrictives. En particulier, supposer qu'équité et efficacité sont séparables dans le monde réel relève de l'auto-persuasion de l'économiste théoricien. S'il n'est pas impossible que cette hypothèse soit une approximation acceptable dans certains cas, il reste cependant à prouver qu'elle est opportune pour le problème de la stabilisation des émissions de GES sur le long terme. On conservera, par défaut, l'hypothèse la plus générale de la non-séparabilité entre équité et efficacité. Deux exemples simples suffisent à montrer que c'est cette hypothèse qui est raisonnable :

- Plaçons nous au niveau infra-national. En général, le taux d'épargne des agents économiques est lié à leur revenu, si bien que toute politique de redistribution entre

pauvres et riches a un impact sur l'épargne nationale et donc sur les capacités de croissance économique. La distribution du fardeau des réductions de GES aura donc un impact sur la dynamique de croissance et sur le coût total des politiques. Le traitement de la question de l'équité conditionne l'efficacité économique.

- Comme nous l'avons fait au chapitre 6, on compare habituellement les instruments de coordination internationale que sont une taxe uniforme et un système de quotas échangeables en supposant une participation complète des Parties. Dans le monde réel, aucun de ces deux systèmes n'a semblé négociable et le Protocole de Kyoto n'a abouti qu'à un système de quotas très partiel. Il pourrait continuer à en être ainsi, par exemple parce que chacun de ces deux systèmes nécessiterait, pour être élargi à l'ensemble des Parties, des transferts que les uns exigeraient et que les autres ne sont pas prêts à consentir. Les seuls systèmes possibles sont ceux qui donneraient aux uns et aux autres la perception d'une répartition équitable et sécurisée du fardeau. Les modalités de (re-)distribution ayant une influence sur l'élargissement de la régulation des émissions de GES, qui lui-même joue un rôle non négligeable dans la facture totale pour un objectif de stabilisation donné, équité et efficacité ne sont définitivement plus séparables.

Ces deux exemples montrent qu'il n'est pas difficile de remettre en cause l'hypothèse de séparabilité. Le second exemple remet aussi en cause directement le paradigme du prix unique puisque celui ne déboucherait que sur une coordination partielle, moins efficace par exemple qu'une coordination totale avec des prix différenciés.

2.2 Une différenciation régionale justifiée par la difficulté d'organiser les transferts internationaux

Le succès intellectuel du « prix unique » tient non seulement à l'argument de la minimisation des coûts totaux de réduction des émissions, mais aussi à la prévention des risques de distorsions supplémentaires de compétitivité et au rejet d'une négociation dans laquelle il faudrait négocier pour chaque pays ou groupe de pays une trajectoire différente de prix du carbone. Proposer une différenciation des prix du carbone relève donc d'une véritable gageure, dans laquelle il faut à la fois proposer de solides preuves théoriques de la rationalité économique de signaux-prix hétérogènes et esquisser un schéma de mise en œuvre concrète qui puisse remplacer de manière opérationnelle la préconisation simple du prix unique.

2.2.1 Une minimisation des pertes de bien-être sans transferts de compensation

La définition d'une stratégie optimale de réduction requiert de choisir un critère d'optimisation. L'économie publique s'applique en général à maximiser une utilité collective, supposée être la somme éventuellement pondérée des utilités individuelles. Cependant, l'utilité étant un concept peu opérationnel, le critère d'optimisation de la décision qui est privilégié est plutôt la minimisation des coûts de la politique mise en œuvre ou la maximisation du revenu réel. Dans le champ des politiques climatiques, une grande majorité de modélisateurs travaillent ainsi sur la minimisation des coûts de réduction des émissions (compilés avec les coûts du changement climatique non évité, dans les analyses coûts-bénéfices) et la préconisation d'un prix unique du carbone dérive directement de cette minimisation des coûts. Mais plusieurs intuitions remettent en question l'équivalence entre la

maximisation du bien-être collectif et la minimisation des coûts de production, ce qui fragilise la rigueur de la condition d'équimarginalité. En particulier, soumis à un prix unique du carbone, l'utilité d'un individu pauvre risque d'être plus sévèrement diminuée que celle d'un individu riche pour trois raisons simultanées :

- **l'effet de décroissance de l'utilité marginale du revenu** : une dépense marginale d'un euro diminue plus l'utilité d'un individu pauvre que celle d'un riche. Si on suppose que l'utilité du revenu est logarithmique, l'égalisation des pertes marginales d'utilité implique que les dépenses doivent être proportionnelles au revenu (Chichilnisky et Heal, 1994 ; Lecocq et Hourcade, 2003).
- **l'effet de parité de pouvoir d'achat** : la persistance d'écarts internationaux dans les prix des biens domestiques fait que la même dépense ne prive pas les individus habitant dans deux pays distincts du même panier de biens. Les habitants des pays dans lesquels les indices de prix sont moins élevés seront plus largement pénalisés, en quantités physiques de biens consommés.
- **l'effet de structure de la consommation :** la part budgétaire de l'énergie dans la consommation finale des ménages tend à diminuer avec le revenu, donc le fardeau budgétaire induit par un prix unique du carbone sera inversement proportionnel au revenu.

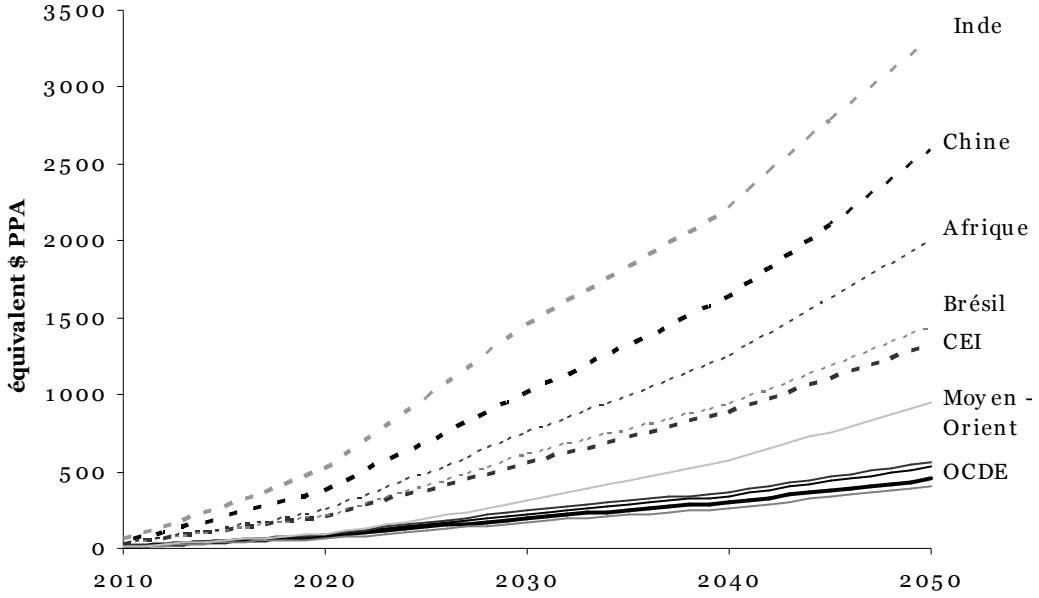


Figure 69 : Perception hétérogène de la taxe unique, en parités de pouvoir d'achat

La réponse classique globale à ces trois problèmes est dans la possibilité de transferts compensatoires, qu'ils soient liés au choix de l'allocation initiale des quotas ou à une redistribution des revenus des quotas vendus aux enchères ou de la taxe carbone. La démonstration de cette possibilité est limpide avec un modèle simple dans lequel le régulateur cherche à maximiser le bien-être collectif W donné par :

$$W = \sum_i L_i \alpha_i u_i \left(c_i \right) \tag{4.47}$$

Dans cette formule, on suppose que chaque individu a une fonction d'utilité u_i qui dépend de son niveau de consommation individuelle c_i et que la fonction d'utilité collective peut-être obtenu par une somme pondérée des utilités individuelles, tenant compte des populations régionales L_i. On se place

dans un cadre coût-efficacité en supposant que la collectivité doit réaliser un abattement global *A*, réparti en contributions individuelles a_i dont le coût est $c_i(a_i)$. On suppose par ailleurs qu'un système de compensations redistributives est mis en place, à travers des transferts entre régions, si bien que chaque individu fait l'objet d'un transfert t_i (ou d'un prélèvement si t_i est négatif), et que la somme algébrique de ces transferts est nulle. Enfin, le budget de chaque individu doit être équilibré en égalisant son revenu y_i à la somme de sa consommation c_i, des coûts de son effort d'abattement $c_i(a_i)$ et du transfert t_i. On peut donc ramener le problème du planificateur bienveillant à la formulation suivante :

$$\underset{a_i,t_i}{Max} \sum_i L_i \alpha_i u_i (y_i - c_i(a_i) + t_i) \tag{4.48}$$

sous les contraintes d'abattement global et de sommation des transferts :

$$\sum_i L_i a_i = A \tag{4.49}$$

$$\sum_i L_i t_i = 0 \tag{4.50}$$

Les conditions du premier ordre de cette maximisation donnent les deux équations suivantes, avec λ et μ les multiplicateurs de Lagrange[119] respectivement associés aux contraintes (4.49) et (4.50) :

$$\forall i \quad \alpha_i u_i'\left(y_i - c_i(a_i) + t_i\right) \cdot c_i'(a_i) = \lambda \tag{4.51}$$

$$\forall i \quad \alpha_i u_i'\left(y_i - c_i(a_i) + t_i\right) = \mu \tag{4.52}$$

En combinant les deux conditions ci-dessus, on obtient la condition d'équimarginalité standard :

$$\forall i \quad c_i'(a_i) = \frac{\lambda}{\mu} \tag{4.53}$$

Dans cette démonstration, il est clair que la possibilité d'opérer des transferts entre les individus donne au régulateur un degré de liberté supplémentaire. La maximisation de l'utilité devient équivalente à une minimisation des coûts *plus* des transferts de redistribution des coûts. On retrouve le résultat démontré par Laffont (1977)[120] dans un cadre très général selon lequel tout optimum de Pareto est déterminé de manière univoque par une taxation uniforme et un jeu de transferts compensatoires entre agents. Si l'on reprend la même démonstration sans la possibilité des transferts, c'est-à-dire en supposant que les commandes du régulateur se limitent à la répartition de l'effort d'abattement *A*, alors les conditions de premier ordre deviennent uniquement :

$$\forall i \quad \alpha_i u_i'\left(y_i - c_i(a_i)\right) \cdot c_i'(a_i) = \lambda \tag{4.54}$$

Dans ce cas, il n'y aucune raison, dans le cas général, pour que les coûts marginaux d'abattement soient égalisés à l'équilibre, c'est uniquement l'utilité marginale pondérée de la dernière tonne réduite qui doit être égalisée. Chichilnisky et Heal ont démontré et défendu ce résultat dès 1994 :

[119] En introduisant la qualité totale d'abattement – proxy de la qualité de l'environnement – dans la fonction d'utilité, on obtient que λ doit être égal à la somme des utilités marginales pondérées de l'environnement.
[120] Cité dans Hourcade et Gillotte (2000).

> "We show that Pareto efficiency dictates that the marginal cost of abatement in each country must be inversely related to that country's marginal valuation for the private good. In particular, it is not generally true that Pareto optimality requires that marginal abatement costs be equated across countries: this is true only if marginal utilities of income are equated across countries, either by assumption of by lump-sum transfers across countries." (Chichilnisky et Heal, 1994, p.444)[121]

Il y a en effet un cas particulier vite tranché, c'est celui dans lequel l'utilité marginale de la consommation est supposée constante et égale pour tous les agents. Alors il importe peu de savoir qui perd et qui gagne, car équité et efficacité sont séparables et la minimisation des coûts de réduction aboutit au résultat bien connu de l'égalisation des coûts marginaux. Plus généralement, quand l'utilité des agents n'est pas égale, il faut et il suffit d'opérer les transferts nécessaires à l'égalisation des pertes marginales d'utilité, tout en maintenant une taxation uniforme pour minimiser le coût technique. C'est lorsque ces transferts ne peuvent être envisagés, soit à cause de résistances politiques à des transferts massifs d'argent, soit à cause des risques macroéconomiques liés aux effets d'équilibre général de ces transferts, que la maximisation du bien-être collectif requiert de ne pas égaliser les coûts marginaux d'abattement. Ce résultat fournit une rationalité théorique forte pour la différenciation des coûts marginaux de réduction *entre agents économiques*.

2.2.2 Une évaluation numérique de la règle de différenciation régionale sans transferts

Le raisonnement qui nous a mené à la préconisation d'une différenciation régionale des taxes carbone, avec le résultat (4.54), a été mené avec un modèle encore très simplifié du monde réel. En particulier, ce modèle heuristique est purement statique, alors que les coûts macroéconomiques de stabilisation dépendent fortement de la chronique de valeur du carbone et des interactions dynamiques entre régions. Il faudrait par exemple combiner une maximisation du bien-être collectif avec la prise en compte des changements de structure de consommation des économies. Mais le modèle analytique devient très rapidement trop complexe pour permettre une résolution simple, laissant toujours un hiatus important à combler entre les modèles théoriques et les modèles numériques qui tentent de fournir une description réaliste des hétérogénéités du monde réel.

Pour tenter de faire le lien entre les deux, nous testons les préconisations analytiques obtenues précédemment dans un modèle numérique complexe comme IMACLIM-R. Pour cela, nous devons d'abord adopter des hypothèses additionnelles pour traduire de manière opérationnelle la condition d'optimalité théorique.

Premièrement, nous devons fixer les poids α_i dans la fonction de bien-être collectif. Pour cela, nous adoptons la posture classique de Negishi (1960) selon laquelle les poids doivent permettre à la situation initiale de distribution des richesses d'être optimale au sens de la fonction de bien-être choisie. Cette posture n'a pas de valeur éthique, elle traduit simplement l'idée que la lutte contre le changement climatique n'est pas le lieu d'une résorption générale des inégalités mondiales préexistantes. D'après Negishi, les poids de la fonction d'utilité doivent être égaux à l'inverse de l'utilité marginale du revenu. Nous pouvons retrouver ce résultat très simplement en résolvant le programme suivant de redistribution des richesses mondiales sous forme de transferts t_i entre individus :

[121] Oliveira Martins et Sturm (1998) reformulent différemment le problème d'optimisation, mais ne s'opposent pas à la conclusion de Chichilnisky et Heal.

$$\underset{t_i}{Max} \sum_i L_i \alpha_i u_i(y_i + t_i) \tag{4.55}$$

sous la contrainte de nullité de la somme des transferts :

$$\sum_i L_i t_i = 0 \tag{4.56}$$

Les conditions de premier ordre sont données par :

$$\forall i \quad \alpha_i u_i'\left(y_i + t_i\right) = \lambda \tag{4.57}$$

Les poids α_i doivent être fixés de façon à garantir que ces conditions de premier ordre sont vérifiées pour des transferts nuls t_i=0 : on retrouve le résultat de Negishi que les poids recherchés sont égaux ou proportionnels à l'inverse de l'utilité marginale du revenu des individus.

Deuxièmement, supposons que la fonction d'utilité est logarithmique pour tous les individus de tous les pays. Alors la condition (4.54) devient, à une constante multiplicative près :

$$\forall i \quad \frac{y_i}{y_i - c_i\left(a_i\right)} \cdot c_i'(a_i) = \lambda \tag{4.58}$$

ou encore

$$\forall i \quad c_i'(a_i) = \lambda \cdot \left(1 - \frac{c_i\left(a_i\right)}{y_i}\right) \tag{4.59}$$

Cette égalité signifie qu'à l'optimum les coûts marginaux d'abattement doivent être différenciés de manière à être corrélés aux pertes de PIB dues aux politiques climatiques. Par exemple, une situation optimale serait que deux pays A et B subissent respectivement des pertes de 0% et 10% pour des prix du carbone respectifs de 100 et 90 euros par tonne de CO_2. Un pays qui serait bénéficiaire de 3% devrait alors réduire jusqu'à atteindre un coup marginal de 103 euros par tonne de CO_2. Le problème de cette règle est qu'elle n'est pas opérationnelle *ex ante*, puisque le terme de droite de l'équation (4.59) est endogène à la réalisation de la politique climatique et ne peut être observé qu'*ex post*. Néanmoins, elle donne un éclairage fort sur l'ampleur de la différenciation. Par exemple, si nous reprenons les montants des pertes et des gains macroéconomiques d'une stabilisation à 450 ppm CO_2-équivalent avec un recyclage sur les charges sociales, et que nous appliquons ces pertes pour différencier les prix du carbone au premier ordre, les taxes carbones s'échelonneraient entre 63 et 82 \$/tCO_2 en 2020, 150 et 220 \$/tCO_2 en 2030 et 310 et 515 \$/tCO_2 en 2050. Mais ces fourchettes, estimées toutes choses égales par ailleurs, ne prennent pas en compte l'effet rebond éventuel de la différenciation des taxes sur les émissions, qui pourrait nécessiter un durcissement additionnel de la contrainte.

Pour illustrer complètement l'effet de la condition d'optimalité (4.59), nous avons calculé un scénario de stabilisation à 450 ppm CO_2-équivalent le long duquel cette condition est satisfaite en tout point du temps. Pour cela, nous avons tâtonné de simulation en simulation en différenciant les taxes imposées à IMACLIM-R selon les pertes constatées à la simulation précédente, et en réajustant l'ensemble des niveaux de taxe pour conserver la même enveloppe d'émissions. Ce tâtonnement nous a amené à converger rapidement vers une simulation qui correspond au critère d'optimalité

souhaité[122,123]. Cela ne correspond pas vraiment à un scénario opérationnel de politique climatique, mais nous pouvons ainsi saisir l'ordre de grandeur des modifications induites par la différentiation.

Le Tableau 36 fournit les profils de taxe que nous avons obtenus par ce tâtonnement. Il apparaît clairement que :

(i) la règle de différenciation permet d'alléger la contrainte carbone sur les régions pour lesquels la transition est très coûteuse, tandis qu'elle renforce la contrainte sur les pays susceptibles de libérer des ressources grâce au recyclage sur les charges sociales ;

(ii) la baisse des réductions d'émissions réalisées dans les pays qui bénéficient d'une différenciation à la baisse oblige à rehausser le niveau de la taxe de référence (c'est-à-dire le niveau de taxe pour un pays qui ne subirait ni pertes ni gains), reportant ainsi sur les pays qui bénéficient d'un gain net une deuxième source d'augmentation de leur signal prix.

Tableau 36 : comparaison des trajectoires de taxes différenciées et de taxe unique

	2010	2020	2030	2040	2050
Taxe unique	10	90	230	310	460
Taxe de Référence	10	100	250	350	480
USA	10.1	104	260	372	511
Canada	10.2	102	247	346	472
Europe	10.2	109	274	396	550
OCDE Pacifique	10.1	104	261	374	512
CEI	10.0	93	214	292	354
Chine	9.6	79	180	280	415
Inde	9.6	83	215	354	510
Brésil	10.1	100	256	400	567
Moyen-Orient	10.0	87	169	225	322
Afrique	10.0	95	234	355	504
Reste Asie	10.0	95	242	365	508
Reste Am Lat	10.1	99	237	335	463

Concernant le premier point, l'effet d'allégement sur les pays dont les pertes étaient les plus importantes – Chine et Inde pour les pertes de transition, et CEI et Moyen-Orient pour les pertes à long terme – est variable d'un pays à l'autre. La Figure 70 permet de comparer les pertes de PIB par rapport au scénario de référence du scénario de taxe unique et du scénario de différenciation régionale. Dans le cas de la Chine, qui bénéficie d'un allègement de taxe sur toute la durée de la trajectoire, le maximum des coûts de transition passe de -36% à -28%. L'Inde, qui bénéficie d'un allégement seulement jusqu'en 2035, puis d'un rehaussement ensuite, est bénéficiaire uniquement pendant sa transition, le maximum des pertes passant de -23% à -19%. Pour la CEI, dont les pertes sont principalement dues à une moindre demande de produits pétroliers, la modulation de la taxe, qui est

[122] Rien ne nous permet de penser qu'il y a unicité de cet équilibre, compte tenu des nombreuses non convexités qui existent dans le modèle.
[123] Au bout de 5 itérations, nous avons réussi à converger vers une simulation dans laquelle la condition (4.59) est respectée à 1% près.

censée compenser partiellement ses pertes grandissantes à partir de 2030, n'a que peu d'effet, en fin de période.

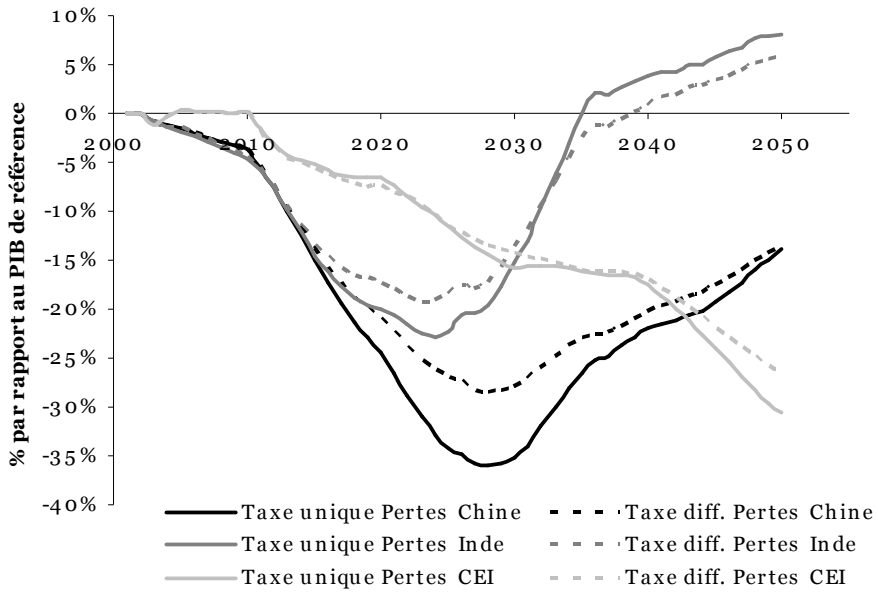


Figure 70 : Comparaison des pertes de PIB réel par rapport au scénario de référence, 450 ppm CO2eq[124]

Au niveau global, nous ne sommes pas en mesure de vérifier si nous sommes à l'optimum en tout point de la trajectoire et les conditions d'optimalité obtenues avec un modèle théorique compact ne sont certainement pas conservées vu la complexité du modèle IMACLIM-R. Néanmoins, nous pouvons vérifier que la différenciation des taxes carbone mène effectivement à une amélioration du bien-être global, avec les hypothèses que nous avons adoptées plus haut – poids de Negishi et utilité logarithmique. Avec ces hypothèses, nous obtenons les profils de bien-être mondial de la Figure 71, qui montrent que la différenciation des prix du carbone permet une amélioration du bien-être collectif de 1 à 2% pendant la transition jusqu'en 2035. Sur le long terme, l'amélioration statique du bien-être collectif est plus que compensée par le durcissement nécessaire des niveaux de taxes pour respecter la même contrainte environnementale et le bien-être mondial est diminué de 0.4% en moyenne au-delà de 2035.

[124] Le scénario de taxation uniforme est celui qui inclut un recyclage des revenus de la taxe dans l'allégement des prélèvements sur le travail.

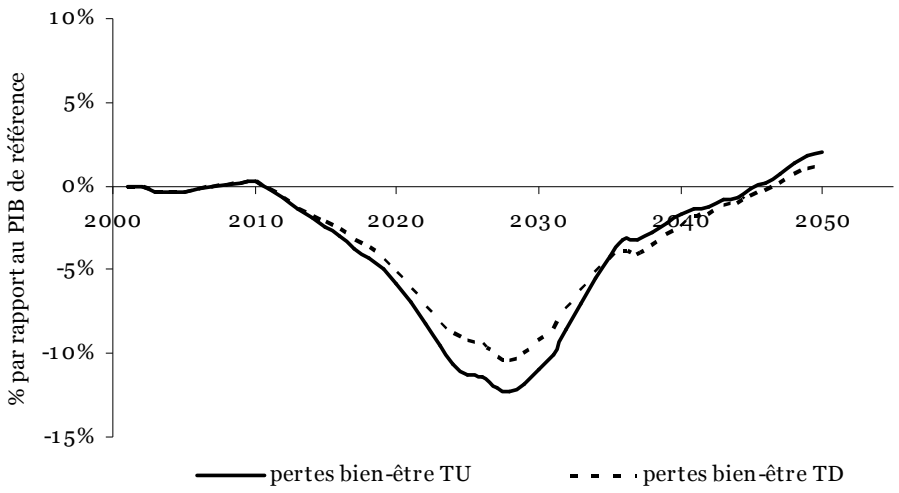


Figure 71 : Pertes de bien-être mondial par rapport au scénario de référence

Cette expérience est révélatrice d'une tension permanente entre l'allégement de la contrainte des pays qui risquent de subir les pertes les plus importantes et la maîtrise de la pression générale sur le prix du carbone de référence. Si l'on poussait la différenciation plus loin, notamment en termes d'allégement de la contrainte sur la Chine et l'Inde, cela supprimerait encore des réductions dans ces pays (à la fois par effet de croissance et par diminution du changement technique) et nécessiterait mécaniquement une hausse homothétique de tous les prix du carbone. Il doit donc y avoir un arbitrage entre d'une part l'allégement temporaire d'une contrainte pour accompagner la transition vers une trajectoire décarbonisée dans les régions dans lesquelles cette transition est plus coûteuse – allégement qui va dans le sens d'une meilleure maîtrise des pertes de bien-être – et d'autre part la minimisation des coûts mondiaux de réduction pour une trajectoire de stabilisation donnée.

La possibilité d'une différenciation régionale peut aussi être justifiée par un certain pragmatisme politique, si l'on part de la situation actuelle de contrôle très partiel des émissions mondiales. Sans transferts, l'instauration d'un prix uniforme du carbone ne serait pas seulement sous optimale, elle serait aussi politiquement inacceptable parce qu'elle comporte des risques macroéconomiques trop élevés. Dans un monde de second rang, il devient nécessaire de trouver la meilleure situation entre une situation de participation très partielle, possible mais très inefficace, comme celle de Kyoto, et une situation théoriquement optimale mais irréalisable, de participation totale et de taxation uniforme avec transferts. Une règle de différentiation de ce type ouvre la voie à de possibles compromis, fondés sur un arbitrage entre le bénéfice de ne pas supporter toute la charge des réductions dans les pays de l'Annexe B et le coût en utilité des politiques climatiques dans les pays hors Annexe B.

2.2.3 Une différentiation régionale avec un accord sectoriel sur l'industrie

L'asymétrie de contrainte que nous venons de représenter entre les régions est susceptible d'entretenir les craintes à propos des distorsions de concurrence qu'elle introduirait dans le commerce international, au même titre que l'exemption pure et simple d'une partie des pays émetteurs d'un accord de type Kyoto. La différenciation sectorielle est alors évoquée comme une piste de protection contre les risques de variations asymétriques de la compétitivité des secteurs exposés à la concurrence internationale, notamment quand la solution alternative des taxes d'ajustement aux frontières n'est pas envisageable. Cela peut conduire les pays les plus contraints à baisser le niveau de la contrainte sur certains secteurs, mais le bilan environnemental est alors incertain, puisqu'il dépend à la fois des fuites

de carbone *évitées* (si le différentiel de contrainte n'est plus suffisant pour justifier une relocalisation, il vaut mieux respecter la contrainte en restant au même endroit) et des réductions que l'on ne fait plus parce que le signal prix rabaissé est moins incitatif pour les secteurs concernés. Plus généralement, les rétroactions réciproques entre régulation environnementale et commerce international ne sont jamais univoques. Copeland et Taylor (2000) montrent par exemple, sans faire d'hypothèses hétérodoxes, que les effets indirects du commerce international remettent en cause, dans le cas général, le paradigme d'un prix unique avec transferts de redistribution[125].

Nous avons comparé les chiffres de la production industrielle dans le cas d'une taxe unique et dans le cas de taxes différenciées, pour évaluer l'ampleur de l'impact de la différenciation régionale sur la localisation de la production. Cet indicateur est le résultat d'effets combinés de la variation de croissance de chaque région entre les deux scénarios et des changements au niveau du commerce international. Les résultats indiquent que les taxes différenciées semblent avoir peu d'effet sur le commerce international :

- Dans les pays de l'OCDE, on note que la baisse de la production n'excède pas 1%, à peine plus que le léger effet négatif de la différenciation sur la croissance.
- Pour la Chine et l'Inde, les hausses de production sont importantes mais transitoires, elles correspondent de fait au bénéfice de la différenciation sur la croissance et à une hausse de la demande domestique pendant la transition, car les exportations chinoises ne dépassent jamais 3% de plus dans le cas des taxes différenciées que dans le cas des taxes harmonisées.
- Pour le Moyen-Orient, la hausse apparemment importante de la production est principalement un effet d'optique lié au fait que sa production de biens industriels est faible dans les deux scénarios. Cette production croît à un taux deux fois plus élevé que la croissance économique de la région, du fait d'une spécialisation croissante pour pallier au manque à gagner du côté des ressources fossiles. La marge de manœuvre libérée par la différenciation permet simplement à cet accroissement de capacité de se faire plus tôt dans le demi-siècle.

Tableau 37 : Variations de la production de biens industriels entre le scénario de taxe unique et le scénario de taxes différenciées

	2020	2030	2050
USA	-1%	-1%	0%
CAN	-1%	0%	0%
EUR	-1%	-1%	-1%
JAN	0%	-1%	-1%
CEI	0%	5%	3%
CHN	5%	10%	0%
IND	4%	2%	-2%
BRE	-1%	-2%	-1%
MO	4%	34%	23%
AFR	-1%	0%	-1%
RAS	0%	-1%	-1%
RAL	-1%	0%	0%

[125] « Specifically, we demonstrate that in an open trading world, but not in a closed economy setting: (1) unilateral emission reductions by the rich North can create self-interested emission reductions by the unconstrained poor South; (2) simple rules for allocating emission reductions across countries (such as uniform reductions) may well be efficient even if international trade in emission permits is not allowed; and (3) when international emission permit trade does occur it may make both participants in the trade worse off and increase global emissions. » (Copeland et Taylor, 2000, pp. 1-2)

Bien sûr, il faut prendre ces résultats avec précaution. D'une part, dans IMACLIM-R, la modélisation du commerce international de biens industriels obéit à une spécification d'Armington, qui ne représente que grossièrement les effets des variations de prix relatifs sur les arbitrages entre biens importés et biens domestiques, et qui ne traduit pas correctement les contraintes de transport de certains biens industriels (Demailly et Quirion, 2005). D'autre part, le niveau d'agrégation du secteur industrie dans le modèle ne permet pas de juger des risques de relocalisation des industries à un niveau de désagrégation plus fin, comme l'industrie cimentière, la sidérurgie, etc.

Néanmoins, ce résultat correspond à certains échos que nous avons eus lors d'entretiens avec des acteurs industriels[126], échos selon lesquels dans les pays de l'OCDE et dans certaines industries, les installations de production deviennent de plus en plus efficaces et le volume de demande est stagnant ou à la baisse, ce qui permet une fermeture progressive d'unités en fin de vie et une limitation des nouvelles unités à construire, tandis que les nouvelles unités sont surtout installées dans les zones dans lesquelles la demande est très dynamique (BRICs, pays pétroliers). Le Tableau 37 fait état de simulations dans lesquelles la différenciation des taxes carbone ne change pas significativement ce diagnostic.

Pour confirmer ce propos, nous avons simulé un scénario dans lequel les taxes sont ré-harmonisées pour les secteurs industriels et suivent le profil de référence du Tableau 36. A part cette rectification, les autres hypothèses de ce scénario sont les mêmes que dans le scénario de taxes différenciées présenté plus haut. La comparaison des deux scénarios confirme que la trajectoire de croissance des pays de l'OCDE est très peu modifiée par ce réajustement des taxes industrielles : la variation de PIB tout au long de la trajectoire est inférieure à 0.5% et la production industrielle y est supérieure seulement de 0.2% à 0.6%, ce qui confirme notre *a priori* de très faible élasticité des changements structurels et des dynamiques industrielles de l'OCDE à une éventuelle différenciation internationale des prix du carbone. Nous observons par contre que l'effet du réalignement des taxes sur l'industrie est sensible pour la Chine, la CEI, le Moyen-Orient et, dans une moindre mesure, l'Inde (Figure 72). Pour tous ces pays, le réalignement des taxes correspond à un réhaussement de la contrainte sur l'industrie et donc à une baisse de production assez sensible : en 2030, la production de biens industriels est inférieure de 6.3% en Chine, 3.8% dans la CEI, 21% au Moyen-Orient ou 3.3% en Inde. En multipliant ces baisses par la part de l'industrie dans les PIB de ces différents pays – on retrouve à peu près les différences de pertes de PIB constatées au creux de la transition : en 2030, la Chine perd 3.4% supplémentaires, l'Inde 1.4%, la CEI, 1.8% et le Moyen-Orient 3.3%. Pour la Chine cela représente la moitié du gain de la différentiation, tandis que pour l'Inde, la CEI et le Moyen-Orient cela annule complètement les bénéfices de la différentiation.

Au-delà de ces indications numériques *stricto sensu*, qu'il faut encore analyser avec précaution car elles sont aussi incertaines que le mode de représentation du commerce international et le paramétrage associé, ces simulations nous alertent sur les enjeux régionaux d'une différenciation régionale des contraintes, ou à l'inverse d'une harmonisation des contraintes par secteurs au-delà des différenciations régionales. Dans les négociations actuelles, la possibilité d'accords sectoriels est au premier plan des discussions, avec le risque de susciter des réactions dans deux directions opposées : d'une part, ils pourraient permettre d'élargir la coordination à certains secteurs des pays émergents,

[126] Projet tri-annuel financé par la FONDDRI pour étudier les enjeux des industries grandes consommatrices d'énergie dans des scénarios de forte contrainte carbone.

même en l'absence d'accord global sur des contraintes régionales, tout en évitant des distorsions de compétitivité ; d'autre part, ils peuvent être soupçonnés par les tenants de la « grande architecture » de saboter la recherche d'une coordination mondiale unique de type Kyoto ou d'en éviter la contrainte, en négociant un régime spécial. En admettant que ces craintes ne sont pas justifiées – notamment parce que la « Grande Architecture » n'est pas forcément une solution (Prins et Rayner, 2007) – il reste aux industriels des pays de l'OCDE, désireux aujourd'hui de proposer des accords sectoriels pour maîtriser et rendre lisible la contrainte à laquelle ils seront soumis dans les prochaines décennies, à convaincre leurs homologues concurrents des pays non contraints de bien vouloir se soumettre au jeu d'un engagement, qui sera « volontaire » tant que leur pays hôte n'aura aucun objectif contraignant. Les résultats obtenus ci-dessus peuvent nous laisser penser que les enjeux de croissance industrielle sont tels dans ces pays là que l'accord volontaire ne pourra être très ambitieux sans la menace d'une contrainte de régulation encore plus élevée à une échéance assez proche.

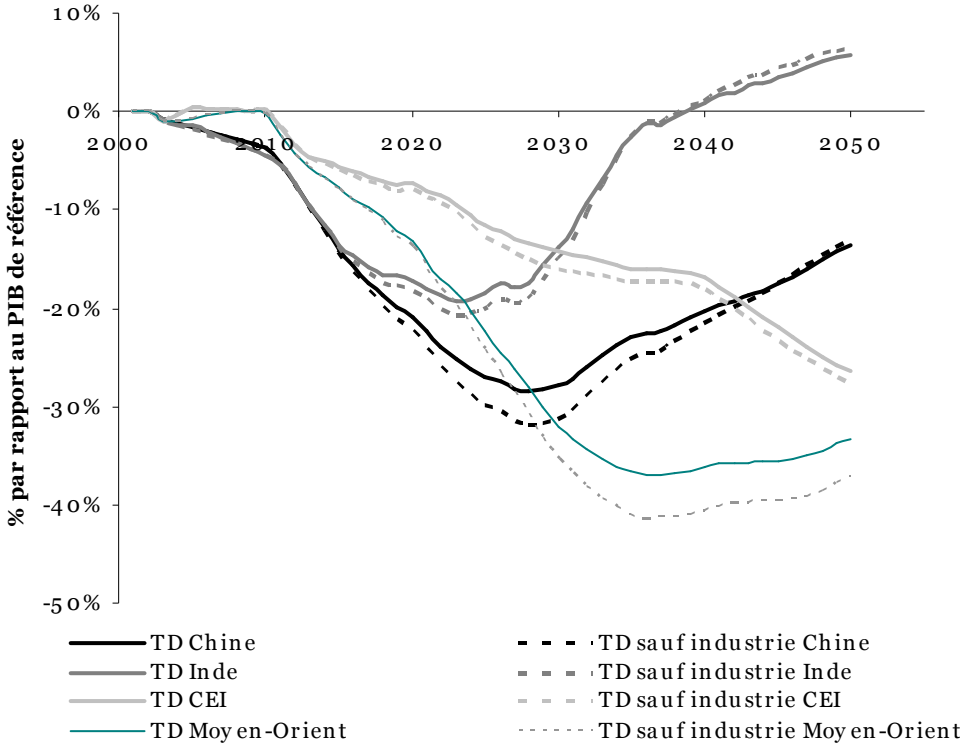


Figure 72 : Comparaison des pertes de PIB réel par rapport au scénario de référence, taxes différenciées par régions, avec ou sans accord sectoriel sur l'industrie, 450 ppm CO2-eq

En conclusion de cette partie, les simulations présentées ici nous conduisent à penser que la différenciation régionale peut contribuer à améliorer l'acceptabilité d'une coordination mondiale, mais qu'elle ne sera jamais suffisante à elle seule pour atténuer les risques de coûts de transition prohibitifs qui apparaissent pour les scénarios de stabilisation les plus bas. La littérature économique ne fournit guère de résultats pouvant être comparés à nos simulations, parce que le problème de la différentiation régionale en est quasiment absent ; la différentiation des taxes n'est abordée qu'au niveau sectoriel, principalement pour des raisons de compétitivité et de fuite du carbone. Nous nous proposons dans la sous-partie suivante d'examiner cette question de la différenciation sectorielle, mais dans un questionnement beaucoup plus large que la seule question de la compétitivité et des risques de fuite du carbone dans les pays sans contrainte carbone.

2.3 Une différenciation sectorielle pour tenir compte des hétérogénéités d'inertie et des anticipations limitées

Dans les études dont nous avons connaissance, la différenciation des taxes concerne en général les secteurs industriels des pays de l'annexe B, avec l'argument que l'asymétrie des contraintes génère des risques de délocalisation, de pertes d'emploi et de fuite du carbone qui justifieraient de différencier à la baisse le prix du carbone pour les industries très compétitives.

Hoel (1996) étudie ainsi la possibilité de différencier les taxes sur les industries intensives en énergie pour pallier les risques de fuite du carbone dans les pays non contraints ; il montre qu'un système de taxes et subventions aux frontières est préférable à une différenciation des taxes, mais que celle-ci est optimale si un tel système aux frontières n'est pas autorisé. Böhringer et Rutherford (2002) citent quatre types d'argument pouvant plaider pour une différenciation des taxes dans un monde de second rang : le système fiscal préexistant, les risques de fuite du carbone vers des pays non contraints, les problèmes de redistribution ou encore les effets d'équilibre général sur les termes de l'échange. Ils testent ensuite ces arguments dans un modèle d'équilibre général et vérifient qu'une légère différenciation peut être optimale dans certains cas, mais rarement en faveur des industries intensives en énergies comme c'est une pratique courante dans les pays de l'OCDE. Babiker et al. (2000) évaluent avec le modèle EPPA le coût de politiques sectorielles différenciées sans échange de permis – ce qui revient à tester des prix du carbone différenciés – pour l'économie américaine ; ils aboutissent au résultat que la différenciation sectorielle sans échange de permis est susceptible de multiplier par un facteur 2 à 4 les coûts totaux de réduction d'ici 2030. Enfin, Bye et Nyborg (2003) comparent des quotas alloués gratuitement, une taxe unique et des taxes différenciées en effectuant des simulations en équilibre général sur la Norvège ; leurs résultats numériques montrent que les systèmes de taxes sont tous les deux préférables au système de quotas gratuits grâce à la réduction des taxes distorsives permis par le recyclage du revenu des taxes – autrement dit, le gain du recyclage est supérieur à la perte d'efficacité de la différenciation. En complément, le coût de la différenciation dans ces simulations reste très modeste, parce que la perte d'efficacité est compensée par le revenu additionnel généré par le fait que les taxes différenciées doivent être globalement plus élevées pour atteindre le même objectif : le gain du recyclage additionnel compense alors presque la perte d'efficacité. Ces contributions isolées ne suffisent guère à fixer les termes du débat, tant sur le plan théorique que sur celui des préconisations politiques, puisque nous restons confrontés à des résultats antinomiques selon les modèles et les cas d'études.

Notre propos est ici d'examiner une autre raison de différenciation sectorielle largement absente de la littérature et des débats théoriques : le rôle crucial de l'inertie dans les changements techniques et structurels de l'économie.

2.3.1 Dynamiques sectorielles hétérogènes et anticipations limitées : une autre raison de différenciation des valeurs du carbone

Notre point de départ est simple et connu, il prend appui sur deux affirmations évidentes :

(i) si la taille et les coûts des potentiels futurs de réduction dépendent des actions de court terme, alors le niveau optimal de l'action à court terme doit prendre en compte son effet sur les potentiels à long terme ;

(ii) les secteurs de l'économie sont caractérisés par des inerties techniques différentes, et des processus de progrès technique distincts.

En combinant ces deux affirmations, on en déduit que le niveau optimal de l'action dans chaque secteur devrait être différencié pour prendre en compte les différences sectorielles de dépendance temporelle entre actions de court-terme et potentiels de long-terme. Cette intuition a déjà été mise en équation par Gilotte (2004), à l'occasion d'une critique du modèle DICE de Nordhaus, qui a la faiblesse majeure de négliger les liens endogènes entre les potentiels d'abattement des différentes périodes et les actions entreprises à chaque période. Cette intuition peut concerner :

(i) **les mécanismes de progrès technique induit** : l'action précoce suscite une baisse des coûts de réduction futurs ;

(ii) **les mécanismes de *lock-in* dans des trajectoires carbonées** via l'inertie des infrastructures : une action précoce sur les choix d'infrastructures réalise des réductions permanentes sur plusieurs périodes même si les politiques climatiques sont abandonnées dans le futur - dans les termes de Gilotte (2004), les émissions *tendancielles* seront plus basses après les réductions des premières périodes.

Il nous semble intéressant de montrer les implications de ces deux types de mécanismes par deux courtes démonstrations simples. Posons d'abord les notations et les hypothèses communes aux deux démonstrations :

- Nous supposons que l'économie peut être décomposée en deux secteurs S_1 et S_2, que l'on va considérer sur deux périodes t_1 et t_2.
- Dans chaque secteur S_i et chaque période t_j, l'abattement réalisé est noté $A_{S_i}^{t_j}$ et est mesuré par rapport à un scénario de référence dans lequel les émissions de chaque secteur à chaque période sont notées $Eref_{S_i}^{t_j}$. Le coût de l'abattement est noté $C_{S_i}^{t_j}\left(A_{S_i}^{t_j}\right)$.
- Nous nous plaçons dans un cadre de décision coûts-efficacité, selon lequel le régulateur cherche à minimiser la somme actualisée des coûts d'abattement sous contrainte d'un objectif d'émissions totales cumulées sur les deux périodes noté $\overline{E}$.
- Dans les deux cas d'études, le secteur S_1 respecte à l'hypothèse habituelle d'indépendance des actions, des potentiels et des coûts d'abattement sur les deux périodes. Le secteur S_2 fait l'objet d'une hypothèse spécifique au cas d'étude.

Cas 1 : Progrès technique induit

Pour traduire l'existence d'un progrès technique induit, notamment d'un effet d'apprentissage (*learning-by-doing*), nous supposons que les actions de réduction dans le secteur S_2 à la première période ont un impact sur les coûts d'abattement de ce même secteur à la période suivante. Autrement dit, nous supposons que les coûts d'abattement de seconde période dans ce secteur s'écrivent :

$$C_{S_2}^{t_2}\left(A_{S_2}^{t_1}, A_{S_2}^{t_2}\right) \text{ au lieu de } C_{S_2}^{t_2}\left(A_{S_2}^{t_2}\right).$$

Le programme du planificateur s'écrit alors :

$$Min \left[C_{S_1}^{t_1}\left(A_{S_1}^{t_1}\right) + C_{S_2}^{t_1}\left(A_{S_2}^{t_1}\right) + \frac{C_{S_1}^{t_2}\left(A_{S_1}^{t_2}\right) + C_{S_2}^{t_2}\left(A_{S_2}^{t_1}, A_{S_2}^{t_2}\right)}{1+\rho} \right] \tag{4.60}$$

Avec la contrainte d'abattre suffisamment pour respecter l'objectif d'émissions cumulées[127] :

$$\sum_{i,j} Eref_{S_i}^{t_j} - \sum_{i,j} A_{S_i}^{t_j} = \bar{E} \tag{4.61}$$

Les conditions de premier ordre de ce programme sont données par les équations suivantes, dans lesquelles λ est le multiplicateur de Lagrange correspondant à la contrainte d'émissions :

$$\begin{aligned}
\frac{\partial C_{S_1}^{t_1}\left(A_{S_1}^{t_1}\right)}{\partial A_{S_1}^{t_1}} &= \lambda \\
\frac{\partial C_{S_1}^{t_2}\left(A_{S_1}^{t_2}\right)}{\partial A_{S_1}^{t_2}} &= \lambda \cdot (1+\rho) \\
\frac{\partial C_{S_2}^{t_1}\left(A_{S_2}^{t_1}\right)}{\partial A_{S_2}^{t_1}} &= \lambda - (1+\rho)^{-1} \cdot \frac{\partial C_{S_2}^{t_2}\left(A_{S_2}^{t_1}, A_{S_2}^{t_2}\right)}{\partial A_{S_2}^{t_1}} \\
\frac{\partial C_{S_2}^{t_2}\left(A_{S_2}^{t_1}, A_{S_2}^{t_2}\right)}{\partial A_{S_2}^{t_2}} &= \lambda \cdot (1+\rho)
\end{aligned} \tag{4.62}$$

Les deux premières conditions concernant le secteur S_1 sont les conditions « classiques » qui traduisent (i) que le coût marginal de réduction est égal au *prix implicite* de la contrainte d'émissions et (ii) qu'il est optimal de faire augmenter le coût marginal au taux d'actualisation de la fonction objectif[128]. Par contre le coût marginal de réduction dans le secteur S_2 à la première période n'est pas égal à celui du secteur S_1 et donc non plus au *prix implicite* de la contrainte d'émissions en première période. Il est supérieur à cette valeur car la dérivée du coût d'abattement de seconde période par rapport à l'abattement de première période est négative, sous l'effet du progrès technique induit. Par conséquent, la stratégie optimale est de faire supporter au secteur S_2 un effort supplémentaire en première période pour réduire les coûts de seconde période. Il s'agit en fait d'un arbitrage entre l'effort additionnel d'aujourd'hui et le gain actualisé de la réduction des coûts de demain. On retrouve là, sans surprise, le résultat connu que l'introduction du progrès technique induit dans les modèles de contrôle optimal joue en faveur d'une action plus précoce (même si les simulations de cet effet dans des modèles numériques soulignent que l'effet reste faible, cf. Goulder et Mathai, 2000).

Cas 2 : Inertie des infrastructures

Pour traduire l'effet d'inertie des choix d'infrastructures, nous allons maintenant revenir à la formulation standard des coûts d'abattement, selon laquelle ils sont supposés dépendre uniquement de l'abattement courant dans le secteur concerné à la période concernée. Par contre, nous supposons que les réductions de la première période dans le secteur S_2 sont réalisées via des choix d'infrastructures, dont la durée de vie couvre au moins les deux périodes considérées. Pour la seconde période, nous supposons que les réductions concernent des changements technologiques flexibles et indépendants du choix des infrastructures, si bien que l'hypothèse d'indépendance des coûts d'abattement des deux

[127] Dans cette démonstration heuristique, nous négligeons l'absorption du carbone par la biosphère, qui introduit un terme de dépréciation lorsque l'on somme des émissions de périodes successives (cf. Gitz, 2004).

[128] Nous rappelons bien sûr que ces résultats proviennent d'un modèle simpliste, et qu'ils sont profondément modifiés dans les modèles plus complets, notamment en ce qui concerne la décision séquentielle dans l'incertain (Ha-Duong et al., 1997).

périodes reste valable. Pour traduire l'effet de rémanence des choix d'infrastructures des émissions, nous supposons que les émissions de référence du secteur S_2 dépendent en fait des efforts d'abattement – c'est-à-dire des choix d'infrastructures – réalisés en première période ; les émissions de référence de seconde période s'écrivent :

$$Eref_{S_2}^{t_2} \cdot \left(1 - \gamma \cdot \frac{A_{S_2}^{t_1}}{Eref_{S_2}^{t_1}} \right) \text{ au lieu de } Eref_{S_2}^{t_2} .$$

Le paramètre γ traduit l'ampleur de l'effet de rémanence des choix d'infrastructures sur les émissions si aucune politique carbone n'est mise en œuvre en seconde période. Si γ vaut 1, l'effet de réduction est homothétique, c'est-à-dire que les émissions de référence de la période 2 sont diminués du même pourcentage que l'abattement de première période. Si l'abattement de première période couvre à la fois des choix d'infrastructures et des changements technologiques réversibles, alors γ sera inférieur à 1.

Reprenons le programme de planification du cas 1, en y rétablissant une spécification standard des coûts d'abattement pour le secteur S_2 en seconde période et en y introduisant notre nouvelle hypothèse sur la persistance de l'effet des infrastructures en période 2. Les conditions de premier ordre deviennent alors :

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial C_{S_1}^{t_1}\left(A_{S_1}^{t_1}\right)}{\partial A_{S_1}^{t_1}} = \lambda \\
&\frac{\partial C_{S_1}^{t_2}\left(A_{S_1}^{t_2}\right)}{\partial A_{S_1}^{t_2}} = \lambda \cdot (1+\rho) \\
&\frac{\partial C_{S_2}^{t_1}\left(A_{S_2}^{t_1}\right)}{\partial A_{S_2}^{t_1}} = \lambda \cdot \left(1 + \gamma \cdot \frac{Eref_{S_2}^{t_2}}{Eref_{S_2}^{t_1}} \right) \\
&\frac{\partial C_{S_2}^{t_2}\left(A_{S_2}^{t_2}\right)}{\partial A_{S_2}^{t_2}} = \lambda \cdot (1+\rho)
\end{aligned} \tag{4.63}$$

De la même manière que dans le cas du progrès technique induit, le coût marginal d'abattement de première période dans le secteur S_2 doit être plus élevé que dans le premier secteur, pour intégrer les conséquences des décisions de court-terme sur les réductions possibles à long-terme. Dans ce cas le surplus d'effort dépend de l'ampleur de l'effet de rémanence des émissions et du dynamisme des émissions du secteur S_2 d'une période sur l'autre.

Implications pour une politique climatique optimale dans un monde imparfait

Jusque là, l'intuition dont nous rendons compte dans ces démonstrations théoriques simples n'apporte rien de plus que les développements plus complexes de Gilotte (2004). Celui-ci conclut qu'il faut bien distinguer le coût marginal instantané et le coût marginal total, qui inclut l'effet de long terme des réductions entreprises en première période. Selon lui, cette distinction ne justifie pas de différencier la taxe dans les deux secteurs à la première période, car chaque agent économique clairvoyant va intégrer dans son calcul optimal les valeurs croissantes de la taxe : en première période, son coût marginal sera plus élevé que la taxe car il réalisera en plus les abattements additionnels requis

pour minimiser la somme de ses coûts actualisés et tenir compte du gain futur liés à l'inertie de ses abattements présents. L'hypothèse centrale derrière cette conclusion est que les agents économiques concernés sont capables d'anticipations parfaites sur leurs coûts futurs de réduction et sur le prix futur du carbone, et qu'ils prennent leurs décisions d'abattement en fonction d'une optimisation intertemporelle de long terme.

Si cette hypothèse est relâchée – comme c'est le cas dans le modèle Imaclim-R par exemple – la préconisation de taxe uniforme ne tient plus : c'est alors le rôle du régulateur d'afficher au secteur des infrastructures (S_2) un signal prix plus élevé que la taxe carbone imposée au reste de l'économie, pour intégrer dans ce signal prix le gain d'évitement du blocage dans une trajectoire carbonée.

Si le régulateur ne remplit pas ce rôle et soumet tous les secteurs au même prix à chaque période, alors le signal prix devra être augmenté aux deux périodes pour respecter la même contrainte d'émissions et une partie du fardeau sera répercutée sur le reste de l'économie (secteur S_1), comme cela a déjà été démontré par Lecocq et al. (1998).

2.3.2 Evaluation d'une différenciation sectorielle

De la même manière que pour la différenciation régionale, nous sommes ici confrontés à un écart persistant entre les approches compactes simplificatrices comme celle que nous venons de développer, et les simulations numériques dans des modèles complexes plus réalistes. Dans IMACLIM-R, aucun secteur ne peut être résumé aussi simplement que dans les exemples heuristiques analysés ci-dessus, car le modèle met en scène l'interaction de nombreux mécanismes dont l'effet combiné peut s'écarter significativement des résultats simples ci-dessus : progrès technique induit, inertie plus ou moins importante, anticipations myopes ou adaptatives, distorsions fiscales préexistantes, effets de commerce international, etc. Ces hétérogénéités apparaissent clairement dans le Pour effectuer de tels tests, nous choisissons de nous concentrer sur un unique pays, la Chine, en gardant à l'esprit qu'un des enjeux de la différenciation des prix du carbone peut être de limiter les risques de coûts de transition élevés. A partir de la dernière simulation précédente de taxe différenciés par régions hors secteurs industriels, nous soumettons successivement quatre secteurs de l'économie à une différenciation unilatérale du profil : Electricité, Usages finaux (résidentiel + véhicules), Agriculture, Services. Dans chaque simulation, nous ne modifions pas le profil de taxe imposé aux autres secteurs, si bien que nous pouvons observer une modification plus ou moins large des émissions globales de la Chine. Dans le cas d'une variation substantielle de ces émissions, nous **pourrons** ensuite disposer d'un ordre de grandeur du réajustement du profil de taxe général qui suffise pour respecter la même trajectoire d'émissions que précédemment.

Tableau 38, qui synthétise les caractéristiques générales des différents secteurs économiques dans la version actuelle du modèle pour toutes les régions. Il s'ensuit que les raisons qui pourraient justifier une différenciation du profil de taxe – dans le sens d'un signal prix du carbone plus élevé en début de période et d'un signal prix général moins élevé – se combinent dans plusieurs secteurs : anticipations limitées dans le temps, progrès technique induit, inertie des réductions. IMACLIM-R peut donc servir de « banc de test » pour évaluer la pertinence de la préconisation d'un profil différencié pour certains secteurs.

En effet, sans aucune prétention d'exhaustivité, il s'avère instructif d'évaluer numériquement l'intuition qu'il serait plus efficace de rehausser le signal prix du carbone en début de période pour les secteurs les plus inertes et/ou avec les effets de progrès technique induit les plus larges, et de pouvoir ensuite modérer la croissance du signal à long terme.

Pour effectuer de tels tests, nous choisissons de nous concentrer sur un unique pays, la Chine, en gardant à l'esprit qu'un des enjeux de la différenciation des prix du carbone peut être de limiter les

risques de coûts de transition élevés. A partir de la dernière simulation précédente de taxe différenciés par régions hors secteurs industriels, nous soumettons successivement quatre secteurs de l'économie à une différenciation unilatérale du profil : Electricité, Usages finaux (résidentiel + véhicules), Agriculture, Services. Dans chaque simulation, nous ne modifions pas le profil de taxe imposé aux autres secteurs, si bien que nous pouvons observer une modification plus ou moins large des émissions globales de la Chine. Dans le cas d'une variation substantielle de ces émissions, nous pourrons ensuite disposer d'un ordre de grandeur du réajustement du profil de taxe général qui suffise pour respecter la même trajectoire d'émissions que précédemment.

Tableau 38 : Hétérogénéité des spécificités sectorielles

Secteurs	Anticipations du prix du carbone	Inertie du secteur	Progrès technique induit	Exposition commerce international
Production d'énergie fossile	Non	Charbon, gaz, raffinage : 3% par an ; Pétrole : en fonction de la déplétion)	Non	+++
Electricité	Oui, anticipation parfaite sur toute la durée de vie des technologies	Par technologie, de 20 à 45 ans	Apprentissage sur coûts des technologies et rendements ; Externalités mondiales (spillovers)	Non
Agriculture	limitée à 10 ans	Générations de capital 20 ans	Accélération des gains d'efficacité	++
Industrie	limitée à 10 ans	Générations de capital 20 ans	Accélération des gains d'efficacité	+++
Services	limitée à 10 ans	Générations de capital 20 ans	Accélération des gains d'efficacité	++
Résidentiel	limitée à 10 ans	1% par an	Accélération pénétration des bâtiments TBE	-
Automobiles	limitée à 10 ans	Générations de capital 12 ans	Apprentissage sur coûts des technologies	-
Transports	limitée à 10 ans	5% par an	Non	+

En résumé, dans ces simulations, trois profils de taxe coexistent donc dans l'économie chinoise (Figure 73). Le profil de différenciation choisi n'est pas tout à fait arbitraire, même s'il ne prétend pas être optimal comme dans les démonstrations théoriques des parties précédentes. En fait, ce profil de différenciation nous permet de tester simultanément deux éléments simultanément :

- **L'effet d'une action précoce et ambitieuse**, et par inversion, le bilan d'un report de l'action : le profil choisi démarre dès 2001 pour atteindre 50 $/tCO2 en 2010 puis 100 $/tCO2 en 2020 au lieu de 10 $/tCO2 et 79 $/tCO2 dans le profil général (et 10 $/tCO2 et 100 $/tCO2 pour le secteur de l'industrie). Il s'agit de déterminer les secteurs dans lesquels une action précoce, avancée de 5 à 10 ans, peut avoir des impacts importants sur les

émissions et sur le coût macroéconomique de la contrainte globale, à cause d'une inertie sectorielle importante ou à cause d'effets d'induction du progrès technique.

- **L'effet d'un plafonnement du prix** après 2020 à 100 $/tCO2 : il s'agit de tester pour quels secteurs l'accroissement continu de la valeur du carbone au-delà de ce seuil ne contribue pas à réduire davantage les émissions mais impose seulement une inflation supplémentaire et une redistribution de rente. En particulier, nous savons que c'est la difficulté de décarboniser le secteur des transports qui peut nécessiter une croissance très forte du prix du carbone alors que tous les autres secteurs ont déjà atteint leurs asymptotes techniques de décarbonisation ou d'efficacité énergétique. Le test du plafonnement du prix permet de tester cette hypothèse sur chaque secteur autre que les transports.

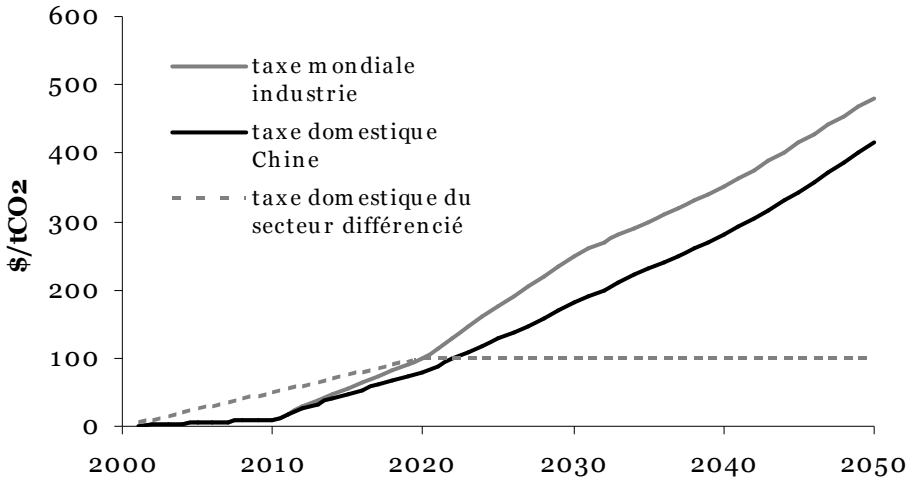


Figure 73 : Profils de taxe sectoriels en Chine

La fournit les résultats obtenus en appliquant ce profil différencié successivement au secteur électrique et à la demande finale, puis aux deux, et enfin avec une correction du profil de taxe pour rétablir le même budget carbone.

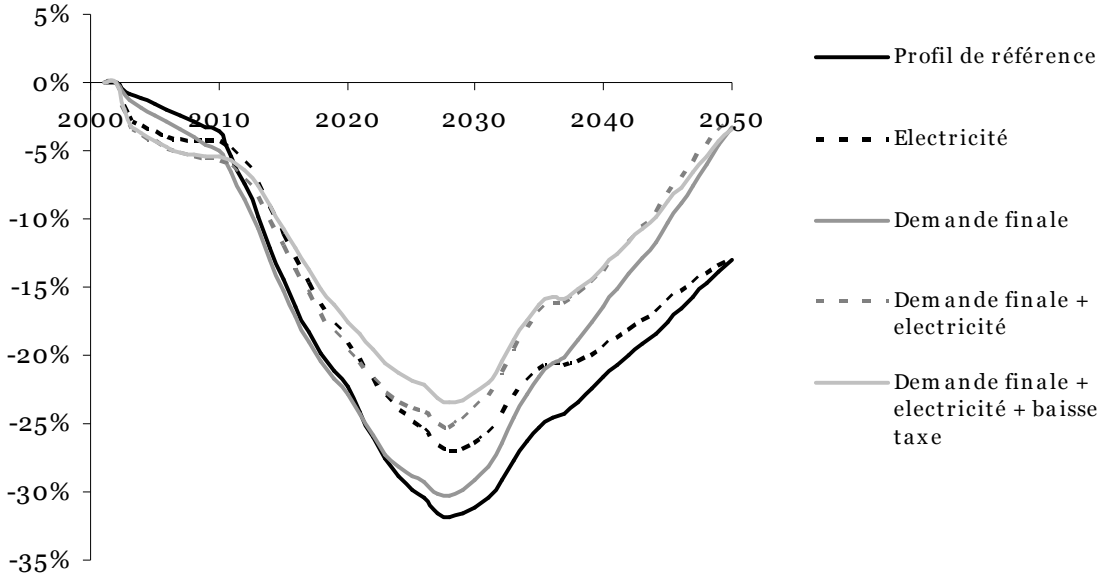


Figure 74 : Pertes de PIB liées à l'application d'un profil de prix du carbone différencié par secteurs

Nous constatons que les effets de la différenciation des prix sur les secteurs testés sont très variables, ce qui nous permet de proposer ici plusieurs exemples éclairants de réponses possibles :

- En appliquant un signal plus précoce au **secteur électrique**, ici caractérisé par une optimisation du parc avec anticipations parfaites du prix du carbone sur la durée de vie des technologies disponibles, le coût actualisé de la politique climatique en Chine passe de 18.4% à 15.9% du PIB actualisé, malgré un surcoût de 1 à 2% dans les dix premières années. Le maximum du coût de transition passe de -32% à -27%. Du point de vue des émissions, le budget carbone cumulé de 2000 à 2050 est réduit de 8%, la précocité de l'action a donc un impact très significatif à cause de l'inertie du secteur[129] et de la croissance très vigoureuse des investissements dans la décennie 2010-2020. A la fin de la période, la décarbonisation est quasi complète dans l'électricité, si bien que les émissions du scénario sans action précoce sont similaires à celles du scénario avec action précoce. Par extension, le niveau de la taxe carbone n'a plus d'effet sur ce secteur décarbonisé, si bien que le niveau de PIB en 2050 est aussi comparable dans les deux scénarios.

- L'application du **profil différencié à la demande finale** – usages résidentiels et transport individuel – a un impact macroéconomique **faible à court terme et largement positif à long terme**, ce qui se traduit par un bilan actualisé de 16.7% au lieu de 18.4%. A court terme, le profil précoce échoue à induire un gain significatif de réductions, parce que (i) les réductions dans le transport et dans le bâtiment ne sont pas encore facilitées par le progrès technique induit, dont l'effet n'est visible que plus tard dans les deux simulations, (ii) sans l'effet du progrès technique induit, un prix du carbone inférieur à 100 $/tCO2 n'est pas suffisant pour

[129] Il faut noter que cette observation serait probablement modifiée par l'introduction dans le modèle de la possibilité de déclasser du capital de manière anticipée : en effet, dans le scénario sans différenciation, la hausse forte de la taxe au-delà de 100 $/tCO2 après 2020 pourrait justifier un déclassement anticipé qui conduirait à diminuer le retard pris.

déclencher des réductions significatives dans les transports individuels, (iii) le secteur du bâtiment est tellement inerte que les réductions supplémentaires du scénario précoce sont marginales. Par conséquent, sur la période 2001-2030, les émissions de la Chine ne sont réduites que de 0.5%. A long terme, en fin de période, le gain du plafonnement de prix à 100 $/tCO2 est très net : il permet de faire baisser le coût de la politique climatique en 2050 à 3.3% au lieu de 13%. Ce gain macroéconomique sans fuite significative de carbone traduit le fait notable qu'avec l'effet du progrès technique induit, permis par deux ou trois décennies de stabilisation à ce prix du carbone, il n'est pas nécessaire de le faire croître plus pour susciter les réductions attendues dans le bâtiment et en partie dans le transport. Le gain macroéconomique traduit aussi que la demande finale reste partiellement carbonée, contrairement à l'électricité, et que ce reliquat de consommation d'énergie fossile rend le secteur toujours vulnérable aux hausses continues du prix du carbone.

- Les secteurs de **l'agriculture** et des **services** apparaissent très peu sensibles à cette modification de profil[130] : le bilan macroéconomique actualisé passe de -18.4% à -18.2% dans les deux cas, tandis que les émissions nationales cumulées ne sont réduites que de 0.4%. En fait, ces deux secteurs sont quasiment décarbonisés dans les deux scénarios de différenciation comme dans le scénario avec profil identique. L'effet de la taxe à long terme y est donc très faible, et on retrouve la même insensibilité à la taxe de long terme que dans le secteur électrique.

Dans tous ces scénarios, nous avons pu vérifié sans difficulté que le commerce international ne jouait pas un rôle significatif dans les modifications de bilan macroéconomique ou d'émissions.

Ces résultats dépendent très fortement des hypothèses d'anticipations, d'inertie et de changement technique dans chaque secteur. La variété des situations sectorielles décrites dans IMACLIM-R a le mérite de souligner les possibles différences d'opportunité d'une différenciation du profil du carbone. Nous pouvons ainsi esquisser au moins deux pistes de recherche originales par rapport au paradigme du prix unique :

- **L'importance du secteur électrique dans le coût de transition** : il est le lieu d'une course temporelle entre la décarbonisation de la production et un accroissement de la demande dû à une substitution vers une électricité de plus en plus rentable par rapport aux énergies fossiles. Par conséquent, il est avantageux d'initier le plus rapidement possible des réductions dans l'électricité avant les autres secteurs, afin de permettre aux usagers finaux de substituer leurs consommations d'énergie fossile vers une électricité déjà décarbonisée et peu renchérie par le prix croissant du carbone. Cette analyse fait sens par rapport à la réalité du transfert du prix du CO_2 dans le prix de vente de l'électricité, comme cela s'est manifesté sur le marché européen de l'électricité soumis au système européen de quotas d'émissions.

- La **pertinence d'un plafonnement du prix du carbone en cas d'asymptotes techniques** de réduction d'émissions : en limitant la hausse continue du prix du carbone aux seuls secteurs dont les potentiels techniques sont plus chers que dans le reste de l'économie (transports,

[130] La courbe correspondant à cette simulation a été retirée de la Figure 74 car elle était dans l'épaisseur du trait du profil de référence

certaines ruptures technologiques dans l'industrie, etc.) et en stabilisant le prix pour les autres secteurs à un seuil supérieur à l'asymptote éventuelle de potentiel technique, le régulateur peut limiter les effets de transferts entre secteurs et la pression inflationniste du prix du carbone, surtout lorsque le reliquat d'énergie fossile est assez important (par exemple dans les usages finaux).

En définissant un profil de carbone mondial uniforme dans les premiers scénarios de stabilisation du chapitre 5, nous avons ignoré les hétérogénéités sectorielles, qui semblent ici justifier une différenciation importante des signaux selon les secteurs. Nous n'avons ici fait que démontrer la pertinence d'une différenciation par l'exemple de quelques simulations, sans explorer tout l'espace de différenciation possible selon tous les secteurs représentés, à la recherche d'une ou plusieurs éventuelles stratégies optimales. Plus qu'une proposition précise d'alternative au paradigme du prix unique, notre démarche ne fait qu'ouvrir de nouvelles pistes de recherche, en suggérant que la complexité et l'hétérogénéité du monde réel – représentées simplement dans IMACLIM-R – méritent un ajustement fin des politiques et des incitations pour limiter les risques macroéconomiques possibles dans une stratégie brutale de décarbonisation radicale et rapide de l'économie mondiale.

En cumulant les différenciations sectorielles ci-dessus dans l'électricité et les usages finaux, et en diminuant le niveau de taxe homothétiquement sur le reste de l'économie hors industrie, nous avons réussi à ramener les pertes actualisées de la Chine à -13% (contre -18.4% sans différenciation). En allant plus loin avec un ajustement plus fin des différenciations, il est probable que nous pourrions gagner encore quelques points de croissance. Couplée à un recyclage des recettes de la taxe ciblé sur les lieux de plus forte vulnérabilité économique au prix du carbone, la différenciation du prix du carbone pourrait donc constituer un outil performant de politique climatique, permettant de ramener les coûts de transition à un niveau plus acceptable, notamment par les grands pays émergents, même sans transferts de compensations internationaux.

3 D'une contrainte carbone « pure » à une réorientation profonde vers une trajectoire durable

3.1 Un écart persistant entre la modélisation et les enjeux du développement durable

Les premiers scénarios de stabilisation produits et analysés dans le chapitre 5 ont permis d'identifier les risques inhérents à l'utilisation du paradigme du prix unique du carbone dans un monde imparfait, et nous avons démontré ci-dessus la pertinence de la différenciation des signaux prix selon les régions et selon les secteurs pour limiter ces risques. Pour éclaircir l'utilisation du terme de « risque », qui pourra étonner le lecteur, puisque nous n'avons fait en fait aucune analyse des incertitudes ni aucune modélisation stochastique, rappelons que l'idée du risque est au centre du paradoxe apparent entre les réticences à l'engagement des décideurs et les évaluations optimistes des modèles. Elle apparaît aussi de manière centrale dans nos simulations avec prix unique du carbone : en montrant numériquement que ce prix unique peut provoquer des coûts de transition très élevés si le monde n'est pas aussi flexible et clairvoyant que dans les modèles usuels, nous donnons effectivement **un support concret aux craintes des décideurs** vis-à-vis du coût effectif des politiques climatiques.

Pour aller plus loin il faudrait réaliser une analyse de l'impact des incertitudes sur le profil des coûts et l'efficacité environnementale de la taxe. Cette analyse de sensibilité pourrait par exemple

permettre de **tester la robustesse des stratégies de différenciation** sectorielle ou régionale des prix du carbone à l'incertitude sur le progrès technique, la croissance future ou l'évolution des marchés énergétiques. Notre intuition est que :

(i) l'instrument-prix conserve l'avantage de la maîtrise des coûts et que c'est l'efficacité environnementale de l'incitation qui serait la plus fortement impactée par l'incertitude ;

(ii) la différenciation des signaux-prix peut être sécurisée en la déployant selon un mode de décision séquentielle, avec la possibilité de réajustements progressifs pour limiter les révisions nécessaires sur les anticipations de long terme des agents économiques ;

(iii) que d'autres outils peuvent être combinés à un système de taxes différenciées pour sécuriser les réductions d'émissions dans certains secteurs sans compromettre la croissance économique.

Cette dernière possibilité nous amène à constater que le cheminement de notre démonstration reste très incomplet car il s'est cantonné à l'instrument économique de la taxe, laissant de côté les nombreux autres outils à la disposition du régulateur pour limiter les émissions de GES. Si cette limitation répond à notre souci de faire émerger pas-à-pas la nécessité de revisiter le paradigme peu contesté de la taxe unique efficace, elle risque dans le même temps de faire persister **une vision partielle des enjeux de réduction** des émissions. Comme nous l'avons mentionné plus haut (Chapitre 5, §2.2 et 2.3), les réductions d'émissions nécessaires ne peuvent en effet être limitées à un défi uniquement technologique, qui consisterait à trouver des technologies de substitution à la majorité des usages d'énergie fossiles et/ou à capturer et stocker une partie des émissions résiduelles. Replacé dans une perspective de développement durable et dans un souci d'efficacité économique, le défi climatique doit simultanément faire appel à un **contrôle amont des déterminants** des émissions.

Dans la pratique, les modélisateurs macroéconomiques se protègent de cette critique en soulignant que dans les modèles, le signal prix est un indicateur des efforts réalisés partout dans l'économie, y compris sur les déterminants amont des émissions, via la propagation du prix du carbone et l'effet induit à tous les niveaux de substitutions. Mais cette précision didactique des modélisateurs sur le statut du signal prix dans les modèles tend à être négligée dans l'interprétation des résultats, si bien que l'on interprète les résultats des modèles comme la démonstration de l'efficacité sans faille d'un instrument interprété à tort comme un *vrai* prix unique universel et non plus comme le *proxy* d'un ensemble d'instruments.

Enfin, il faut souligner que certains déterminants amont des émissions – infrastructures, schémas d'organisation du territoire et des formes urbaines, intensité en matériaux des biens de capital, etc. – sont mal représentés dans les modèles, contribuant à supporter l'idée partielle qu'un signal prix peut susciter sans problème toutes les réductions requises dans tous les secteurs, sans jamais se heurter à une contrainte dure liée aux choix de développement.

Ces biais d'analyse ont un impact important sur la pertinence des recommandations économiques tant à court terme qu'à long terme.

A court terme, l'enjeu est primordial pour les pays émergents et en développement : il s'agit d'une part de montrer qu'une politique climatique ambitieuse peut contribuer à **rendre soutenables les perspectives actuelles de développement soutenu**, et d'autre part d'**éviter les risques d'effet de cliquet** des choix d'organisation et d'infrastructures dans des trajectoires très intensives en énergie et en carbone. Le diagnostic usuel que le coût de la politique climatique est faible, à condition qu'elle consiste en un prix universel du carbone, a toutes les chances de manquer ces deux cibles, avec le risque d'un coût de transition élevé et d'impotence du signal prix du carbone sur les choix

d'organisation du territoire, de localisation d'activité et les choix d'infrastructures. Par ailleurs, comme le soulignent G. Prins et S. Rayner (2007), la non prise en compte des autres leviers de décision que le prix unique peut conduire à des aberrations économiques, quand le développement des infrastructures est totalement déconnecté de la pression mise sur les émissions via un mécanisme de taxes ou de quotas échangeables :

> « In Britain, early 2007 found the Environment Secretary announcing his enthusiasm for personal carbon allowances (…) this policy debate is being conducted alongside other governmental priorities that have a quite different focus. The government is raising the marginal costs of train travel, making plans to expand airports, widen motorways, build roads, and build large numbers of new houses in food-plains. » (pp. 5-6)

A très long terme, c'est-à-dire au-delà de 2050, la question d'**un nouveau redécollage des émissions** et de la stabilisation ultime des concentrations se pose. En effet, comme il existe des obstacles techniques (par ex. potentiels de biocarburants limités pour les transports) et économiques (charbon bon marché) à une décarbonisation complète de toute l'économie mondiale et que la séquestration du carbone ne pourra certainement pas être généralisée à 100% des émissions résiduelles, l'absence d'une maîtrise explicite des déterminants amont des émissions (besoins de mobilité, besoins de transports commerciaux, explosion des surfaces habitées ou à usage tertiaire, etc.) fait peser un risque significatif de rebonds des émissions à long terme, empêchant toute stabilisation des concentrations en dépit des efforts de bifurcation des premières décennies. A notre connaissance, cette question est absente de la littérature sur les scénarios de stabilisation, d'une part parce que la majorité des modèles ne produisent pas ce type de phénomènes parce qu'ils ne représentent aucune asymptote technique absolue, d'autre part parce que l'horizon temporel des simulations limité à 2050 voire même à 2100 peut jouer le rôle d'un effet de masque commode pour ne pas ouvrir cette boîte de Pandore du très long terme (Figure 75).

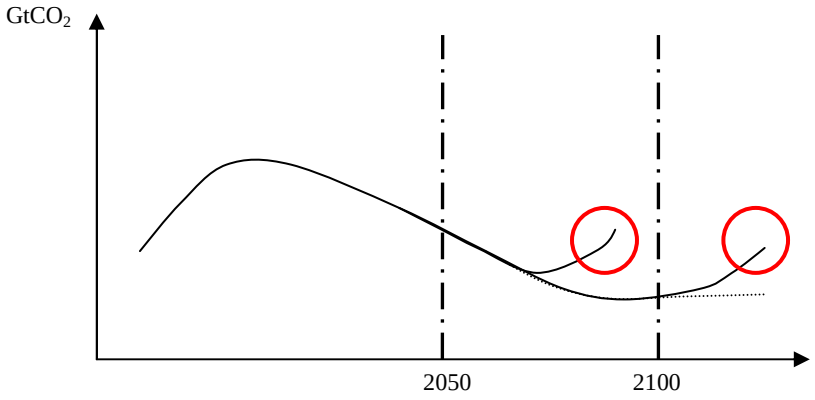


Figure 75 : Effet de masque de l'horizon temporel des modèles sur le rebonds des émissions

En contraste avec le nombre très restreint d'instruments représentés dans les simulations numériques et avec le discours du prix unique, les rapports d'évaluation du GIEC successifs insistent sur la multiplicité des leviers pouvant permettre de bifurquer vers une trajectoire de stabilisation et resituent l'instauration d'un prix du carbone dans un large panel d'outils disponibles :

> « A wide variety of national policies and instruments are available to governments to create the incentives for mitigation action. Their applicability depends on national circumstances and an

understanding of their interactions, but experience from implementation in various countries and sectors shows there are advantages and disadvantages for any given instrument. […] Policies that provide a real or implicit price of carbon could create incentives for producers and consumers to significantly invest in low-GHG products, technologies and processes. Such policies could include economic instruments, government funding and regulation »

Parmi tous ces outils, seules les politiques de l'innovation ont fait l'objet d'un effort de recherche particulier, dans le cadre plus général des questions sur le progrès technique *induit*. Globalement, toutes les études convergent pour souligner qu'un renforcement précoce des efforts de R&D orientée vers les technologies efficaces et non-carbonées est un outil complémentaire à l'affichage d'un signal-prix, en ayant un effet toujours positif sur les coûts nets des politiques climatiques, avec relativement peu d'effet d'éviction sur les financements disponibles (Edenhofer et al., 2006).

Finalement, il est clair que ni les affirmations généralistes du GIEC ni ces résultats concernant les outils d'innovation ne suffisent à répondre à nos insatisfactions concernant le recours à un panel plus large d'instruments de maîtrise des émissions, en particulier sur les déterminants de long terme des émissions liés aux schémas d'organisation spatiale des activités et aux besoins d'énergie qui en découlent. Malgré une demande très forte pour ce type d'évaluation de la part des décideurs ou des experts des pays en développement, la littérature scientifique fait état d'une vraie pauvreté en la matière, comme en témoigne le caractère purement littéraire et non quantifié du paragraphe « Sustainable Development and Climate Change Mitigation » du résumé pour les décideurs du dernier rapport du GIEC. L'enjeu de la dernière partie de cette thèse est donc d'esquisser des pistes de recherche sur ce chaînon manquant de l'évaluation des politiques de réduction, en proposant quelques simulations numériques sur l'impact du recours à des outils complémentaires de maîtrise des schémas de développement.

3.2 Eviter le mimétisme des styles de développement

Pour comprendre les interactions possibles entre politiques climatiques et développement soutenable, nous proposons d'interpréter les déterminants amont des trajectoires d'émissions selon quatre grandes catégories de forces motrices[131] :

- des forces de **changement démographique** – croissance, vieillissement, flux de migrations – certainement corrélées au niveau de développement économique, mais selon des relations complexes que nous connaissons très peu ;
- des forces de **progrès scientifique et technique**, d'innovation, d'économies d'échelle, de changement structurel, d'évolution des stocks de ressources, qui concourent à modifier la frontière globale des possibilités techniques *dans le monde* ;
- des forces de **convergence** entre régions, qui ne portent pas seulement sur les technologies, mais aussi sur les modes d'organisation et de développement, ou sur des préférences induites par les technologies mises en œuvre ou simplement existantes ;
- des forces de **divergence** entre régions, par exemple liées à des rendements croissants d'un côté et des trappes à pauvreté de l'autre, à des usages et régimes sociaux spécifiques à chaque

[131] Nous avions proposé au chapitre 5 une séparation en trois groupes : déterminants macroéconomiques, évolutions technologiques et styles de développement ; la nouvelle lecture proposée ici est transversale et plus adaptée à la discussion des possibles bifurcations vers des trajectoires soutenables.

région ou pays, à l'hétérogénéité des situations géographiques ou climatiques, à la disponibilité des ressources naturelles, etc.

Si l'on confronte ces quatre familles de « forces » au contexte de la modélisation prospective, il faut reconnaître que la dernière est largement négligée dans les scénarios produits. En effet, la production de scénarios de réduction des émissions débute toujours par la constitution d'un scénario de référence, auquel on applique ensuite un prix du carbone (via des quotas échangeables ou des taxes). Les scénarios de référence utilisés reposent en général uniquement sur les trois premières catégories de forces, avec un tropisme fort pour les relations de convergence ou de « mimétisme » : rattrapage de productivité, « leap-frogging » sur les technologies énergétiques, équipements finaux des ménages, etc. Bien sûr, cette méthode est principalement liée au fait que notre capacité de projection mentale et numérique des trajectoires possibles est ancrée à notre connaissance de la situation présente et des tendances passées. En termes de modélisation, cet ancrage se traduit d'une part par le calibrage de certaines fonctions de comportement sur les tendances passées (par ex. les fonctions de demande finale) et d'autre part par des hypothèses de rattrapage de certains indicateurs entre pays en développement et pays développés (surface par habitant, équipements, technologies, etc.). Si cette approche permet une représentation plausible des forces de convergence présentes à l'échelle mondiale, elle constitue aussi une limite méthodologique, puisqu'elle empêche de penser et de projeter des ruptures éventuelles dans les trajectoires futures.

Dans ce contexte, la méthode usuelle de production des scénarios de stabilisation qui consiste à imposer un système de prix du carbone à un scénario de référence *globalement convergent* ne peut générer de rupture significative vers une trajectoire de développement durable. Cette méthode aboutit simplement à tordre suffisamment les forces de progrès technique via le(s) prix du carbone en maintenant les mêmes forces de mimétisme que dans le scénario de référence. Là encore, ce constat ne disqualifie pas forcément ces scénarios comme des projections aberrantes, parce qu'il existe de bonnes raisons de penser que les PED pourraient converger vers des modèles de développement similaires à ceux des pays développés, même avec un prix du carbone croissant **:**

- facilité des transferts de technologies existantes entre pays,
- mondialisation de l'innovation technologique, avec compétition croissante des BRICs,
- aspiration aux mêmes services en milieu urbain : mobilité, logement, énergie, information, loisirs, etc.
- déficit d'incitations et d'institutions pour définir d'autres styles de développement (croissance ultra rapide, « lock-in » déjà enclenchés, report de la coopération internationale).

Au contraire, prenant le contre-pied des quasi-réflexes de méthode de projection, nous pouvons envisager de bonnes raisons pour que les PED bifurquent vers d'autres types d'itinéraires, via par exemple une planification et une réorientation « éclairées » des infrastructures, des politiques de réaction à une dégradation rapide de la qualité de vie et de l'efficacité économique en zone urbaine, une politique de protection face à un contexte énergétique mondial très incertain, ou encore l'effet additionnel d'une aide au développement recentrée sur la durabilité. Parmi ces bifurcations, il faut probablement s'attendre à constater des **dynamiques de progrès** vers un développement durable – gestion durable des ressources, nouveau paradigme de développement harmonieux Chinois, collaboration face au changement climatique, renforcement des institutions mondiales, etc. – mais aussi des **dynamiques de fragmentation** du monde économique et politique – une compétition *géopolitique* accrue entre des blocs devenus concurrents (USA, UE, Chine, Inde, Russie), un contrôle de plus en plus stratégique des ressources énergétiques, une aversion croissante aux transferts

internationaux, une possible remilitarisation, un accroissement des inégalités ou encore des effets de ruptures dues aux dommages climatiques.

La compatibilité entre un monde fragmenté et la recherche de stratégies durables peut être mise en doute. Bien que les scénarios SRES de la famille B2 faisaient en quelque sorte le pari que cette combinaison était possible, nous ne pouvons nous empêcher de penser que la fragmentation du monde – dans le sens pris ici d'une hausse généralisée des tensions internationales – est un contexte très peu favorable à la recherche d'un développement durable pouvant nécessiter une large coopération mondiale (au moins du point de vue du climat). Mais plutôt que de chercher à trancher cette question de prospective discursive, nous voudrions surtout insister sur le fait que les bifurcations dont il est question relèvent en grande partie de choix collectifs et pas d'une incertitude irréductible sur le monde futur. Dès lors, il ne s'agit plus seulement de savoir quelles forces de convergence ou de divergence et quelles dynamiques de progrès ou de fragmentation devraient figurer parmi les « ingrédients » des scénarios de référence, mais de replacer la possibilité d'orienter ces forces à travers les choix publics.

Cette discussion n'est pas nouvelle, puisqu'elle ne fait que reprendre et poursuivre le fil des préoccupations fortement exprimées dans le passé, notamment lors des conférences de Stockholm en 1972 et de Rio de Janeiro en 1992, sur la nécessité de réconcilier Environnement et Développement. Aujourd'hui un certain nombre de projets politiques dans les pays émergents ou en développement relèvent de cette volonté de divergence maîtrisée des styles de développement. A titre d'exemple, l'UNEP a recensé[132] dans la région Asie Pacifique un certain nombre de politiques qui reposent sur le principe d'un développement non-mimétique :

- la méthode 3R – Reduce, Reuse, Recycle – initiée par le Japon, inscrite dans plusieurs textes de loi japonaise et maintenant exportée, notamment en Chine et en Inde ;
- l'initiative chinoise de l'économie circulaire (Circular Economy) ;
- le projet d'économie de la connaissance (National Knowledge Economy) en Inde ;
- le projet national d'auto-suffisance de l'économie thaïlandaise (Sufficiency Economy), porté par le roi Bhumidol Adulyadej ;
- le plan d'actions « Green GDP Growth » adopté par 340 délégués asiatiques à la 5ème Conférence Ministérielle sur l'Environnement et le Développement en Asie – Pacifique en mars 2005.

Lors des négociations, les pays du G77 continuent de soutenir leur position habituelle selon laquelle leurs priorités de développement économique ne doivent pas être menacées par les instruments de coordination des efforts de lutte contre le changement climatique, plaidant pour une inversion du lien entre climat et développement (Hourcade, Shukla et Mathy, 2005).

Dans le régime de Kyoto, le Mécanisme de Développement Propre faisait figure de bras de levier unique pour susciter les projets de développement allant dans le sens de la réduction des émissions. Néanmoins l'expérience montre que ce bras de levier est *limité*, parce qu'il est conçu au niveau *projet* et est encadré par des règles de méthodologie très rigoureuses, et *biais*, parce qu'il a suscité en priorité des projets technologiques sur les autres gaz que le CO_2, avec peu d'impact sur le développement. La proposition des SD-PAMs (Sustainable Dévelopment Policies And Measures) portée par l'Afrique du Sud auprès de la CNUCCC s'inscrit dans la perspective d'un assouplissement du CDM, mais toujours avec un suivi précis des réductions réalisées.

[132] http://www.rrcap.unep.org/projects/nsds/pub/SUSTAINABLE%20DEVELOPMENT%20PATHWAYS.pdf

En ce qui concerne les nécessaires efforts de prospective économique requis pour dépasser les limites des méthodes usuelles de modélisation, plusieurs équipes dans le monde affichent leur volonté de faire évoluer les pratiques.

Le réseau « Development First » (Development and Climate Project) porté par l'UNEP et réunissant 12 instituts de recherche dans les pays développés et en développement, s'est constitué en 2002 pour tenter de susciter une interaction plus productive entre chercheurs des pays développés et pays en développement autour de ces questions, et plus précisément pour replacer la lutte contre le changement climatique dans la stratégie globale de développement durable. Dans le cadre de ce réseau, quatre rapports nationaux pour le Brésil, l'Inde, la Chine et l'Afrique du Sud publiés en septembre 2007 détaillent les synergies entre stratégies de développement durable et politiques climatiques, scénarios quantifiés à l'appui.

Le projet *Low Carbon Society* porté conjointement par le Japon (NIES) et le Royaume-Uni (DEFRA) partait du même positionnement pour d'une part faire émerger, à travers des échanges étroits entre décideurs et scientifiques, les « ingrédients » des synergies entre développement durable et politiques climatiques et d'autre part susciter des travaux de modélisation permettant de générer des scénarios de développement durable et pauvres en carbone. Mais les messages délivrés dans les publications finales du projet n'apportent guère d'innovation par rapport au discours habituel et aux méthodes de modélisation en cause.

En résumé, notre diagnostic est que les insatisfactions vis-à-vis des méthodes de représentation des dynamiques des pays émergents et en développement sont connues et partagées (par ex. Garg et Shukla, 2002), que les discours sur la nécessité d'intégrer les politiques climatiques dans des stratégies plus larges de développement durable sont très largement répercutés dans les lieux internationaux d'expertise et de négociations (GIEC, UNFCCC), mais que la révision des pratiques de modélisation est peu ou pas envisagée pour mieux représenter les implications de ces possibles leviers d'action.

3.3 Un scénario de développement non-mimétique : leçons et pistes de recherche

Pour identifier quels sont les leviers possibles de politiques et mesures, une première étape consiste à revenir plus précisément sur les ingrédients des possibles bifurcations « non-mimétiques ». Il faut pour cela remonter aux déterminants amont des émissions que nous avons classés dans la catégorie « styles de développement » au chapitre précédent, et que l'on sait peu sensibles à un éventuel prix du carbone. Nous envisageons trois canaux par lesquels les styles de développement et d'organisation ont un impact important sur les émissions :

- **Les besoins de services de transport**, qui concernent autant le transport de passagers que le fret de marchandises, et qui incluent à la fois une dimension quantitative (quels sont les besoins de base de mon économie en services de transport compte tenu de sa structure et de son organisation géographique ?) et modale (quels sont les modes alternatifs disponibles ?) ;

- **Les besoins de matériaux de construction** – parmi lesquels l'acier, le ciment, l'aluminium, le verre, le bois – pour alimenter la construction, l'entretien et la rénovation des infrastructures, le déploiement des outils de production, des bâtiments et des équipements semi-durables ;

- **Les besoins énergétiques captifs des bâtiments**, qui dépendent de la structure et de l'âge du bâti, et donc de l'organisation spatiale, horizontale et verticale des lieux d'habitation, de vie, de travail et de commerce.

Bien sûr, dans ces trois cas, il existe des solutions technologiques permettant de diminuer l'intensité énergétique des services mentionnés : *dans les transports*, les possibilités de motorisation électrique, hybride, ou même hydrogène et l'utilisation massive d'agrocarburants ; *dans les industries de production de matériaux*, la substitution vers des technologies électriques, l'amélioration de l'efficacité énergétique, certaines ruptures technologiques avancées (par ex. ULCOS pour la sidérurgie) ; *dans le bâti*, optimisation thermique, double vitrage et isolation, techniques de chauffage et climatisation plus efficaces, etc. Mais toutes ces solutions, susceptibles d'être en grande partie implémentées sous l'effet incitatif d'un prix du carbone et correctement prises en compte dans les simulations usuelles, ne constituent qu'une partie des potentiels de réduction liés aux besoins finaux de transport, de matériaux et d'énergie « captive ». De plus, nous avons déjà souligné le risque de redécollage des émissions dans les cas où les potentiels technologiques de décarbonisation ou d'efficacité énergétique sont limités, et où aucune maîtrise des déterminants n'est réalisée en amont. Conséquence directe de l'existence de ces asymptotes de changement technique, les scénarios de stabilisation exigent à plus ou moins long terme que le prix du carbone croisse fortement, non plus pour induire un progrès technique cher, mais pour tenter de contingenter, in fine, les déterminants des émissions qui ont été négligé en amont.

Nous touchons ici aux politiques et mesures « non-mimétiques », qui consistent à maîtriser ces déterminants amont dès l'origine et simultanément aux évolutions techniques, et non pas en dernier recours quand les potentiels technologiques arrivent à saturation. A titre d'exemple, dans le dernier scénario que nous avons produit dans la deuxième partie de ce chapitre, le contrôle des émissions ne passait que par des solutions d'efficacité énergétique ou de décarbonisation, sans entraîner, à l'horizon 2050, aucune pression sur les usages. Du coup, certains indicateurs d'activité augmentent significativement dans le scénario de réduction grâce aux gains de croissance et aux gains d'efficacité cumulés. Pour l'illustrer il suffit de se référer au Tableau 39, qui fournit l'évolution des indicateurs du transport en voiture individuelle et de la production industrielle dans notre scénario de référence et dans le dernier scénario « mimétique » : mis à part pour les pays du Moyen-Orient, qui subissent un ralentissement important de leur croissance par rapport au scénario de référence, il est clair que le prix du carbone ne modifie pas significativement les dynamiques de croissance de ces indicateurs, c'est-à-dire que les réductions de ces secteurs passent uniquement par des changements technologiques induits par la croissance forte du prix du carbone sur toute la période.

Tableau 39 : Coefficient multiplicateur des indicateurs d'activité sous contrainte carbone « mimétique » entre 2000 et 2050 : passagers-kilomètres en véhicules particuliers et production du secteur industrie

		REF	450 ppm mimétique		REF	450 ppm mimétique
USA	*pkm VP*	1.4	1.4	*Q industrie*	3.4	3.5
Canada	*pkm VP*	2.0	2.1	*Q industrie*	2.7	3.3
Europe	*pkm VP*	1.8	1.6	*Q industrie*	3.0	3.6
OCDE Pacifique	*pkm VP*	1.7	1.8	*Q industrie*	2.5	2.6
CEI	*pkm VP*	4.4	4.0	*Q industrie*	2.9	3.5
Chine	*pkm VP*	17.5	18.3	*Q industrie*	7.0	6.6

Inde	*pkm VP*	37.5	41.3	*Q industrie*	21.7	21.5
Brésil	*pkm VP*	6.8	7.8	*Q industrie*	8.0	9.1
Moyen-Orient	*pkm VP*	12.6	9.8	*Q industrie*	8.3	5.9
Afrique	*pkm VP*	21.3	24.2	*Q industrie*	23.6	25.1
Reste Asie	*pkm VP*	16.3	17.8	*Q industrie*	11.5	11.7
Reste Am Lat	*pkm VP*	8.3	8.5	*Q industrie*	6.7	7.6

Les trois types de besoins mentionnés ci-dessus ne constituent pas encore le niveau auquel des politiques et mesures peuvent s'appliquer. Ces besoins sont fortement interdépendants parce qu'ils ont comme dénominateur commun l'organisation spatiale des activités et des flux de matière, d'énergie et de personnes. En remontant d'un niveau dans la chaîne de causalité, nous avons identifié les lieux d'intervention suivants:

- **Le contrôle de la structure urbaine**, regroupant :
  - ✓ L'étalement ou la concentration du bâti, en contrôlant l'expansion horizontale et verticale de la ville ;
  - ✓ Les choix de rénovation et/ou d'extension du parc, qui influent sur la pyramide des âges du bâti et la composition du parc ;
  - ✓ La répartition des activités dans la ville – fonctions résidentielle, commerciale, culturelle, industrielle – à travers le zonage et les règles d'urbanisme ;
  - ✓ Le développement des infrastructures de transport et le contrôle des flux en temps réel ;
  - ✓ Le développement des réseaux urbains (eau, énergie, chaleur, assainissement, déchets) ;

- **Le contrôle des flux de transport sur moyenne et longue distance**, à travers :
  - ✓ le développement maîtrisé des infrastructures routières, ferroviaires, fluviales, portuaires et aéroportuaires ;
  - ✓ la création de boucles d'économie locale, y compris des réseaux courts de récupération, de recyclage et de réutilisation (3R) ;

- **La dématérialisation de l'économie**, grâce à :
  - ✓ L'organisation et la mise en œuvre de systèmes de recyclage à grande échelle ;
  - ✓ Le développement et la généralisation de l'accès aux nouvelles technologies de l'information ;
  - ✓ Des mécanismes incitatifs au développement de matériaux améliorés, pouvant fournir les performances souhaitées avec des quantités moindres ;
  - ✓ Le développement de filières de matériaux de substitution comme le bois.

Il apparaît très clairement dans cette liste non exhaustive que les leviers d'action mentionnés ne sont pas tous du même ordre. Premièrement, ils diffèrent sur **les horizons de temps** auxquels ils se rapportent : un réseau de collecte, tri et valorisation sélective des déchets à l'échelle locale ou nationale peut être opérationnel en une dizaine d'années, tandis que l'évolution des formes urbaines et le développement des infrastructures doit être planifié sur des horizons plus étendus. Deuxièmement, ces leviers d'action peuvent avoir **une portée très différente en fonction des situations nationales**, et en particulier selon le niveau de développement du pays concerné. En Europe ou aux Etats-Unis, la maîtrise des formes urbaines est rendue difficile par l'existence d'infrastructures et d'un parc bâti très lourd qui évoluent lentement ; il ne peut s'agir que d'une *refonte* progressive de l'organisation des

villes existantes. Dans les pays émergents et en développement, il peut exister des fenêtres d'opportunité plus ou moins étendues dans le temps pour faire bifurquer la structure de villes actuellement en fort développement, avant qu'il ne soit trop tard. En fait, la situation diffère très largement d'une mégapole à l'autre, en fonction des infrastructures et du bâti déjà construits et des politiques de réorganisation urbaine[133].

Dans sa version actuelle, le modèle IMACLIM-R permet d'esquisser des pistes d'évaluation partielle des politiques de bifurcation « non-mimétiques » dans les pays émergents, dans la mesure où il représente l'induction du partage modal par les infrastructures, les dynamiques d'évolution des logements et des équipements d'usage finaux. Il reste nécessaire de consentir à « résumer » l'information complexe et hétérogène qui caractérise chaque contexte urbain, régional ou national à quelques paramètres agrégés dans le modèle. De ce fait, les simulations réalisées avec un modèle mondial comme IMACLIM-R ont surtout un rôle démonstratif sur le poids potentiel des politiques et mesures mentionnées ci-dessus dans les stratégies de réduction des émissions.

Pour ne pas compliquer l'évaluation du rôle des styles de développement dans la lutte contre le changement climatique, en les mêlant avec les tests de différenciation des prix du carbone que nous avons apportés dans la deuxième partie de ce chapitre, nous repartons ici du scénario de stabilisation 450 ppm CO2-équivalent du chapitre précédent avec un prix unique mondial. A partir de ce scénario, nous avons choisi de tester la mise en place par les gouvernements chinois et indiens de politiques volontaristes de limitation des infrastructures routières et de développement des autres modes de transport. Dans les simulations réalisées jusqu'ici, dans toutes les régions, la dynamique des infrastructures de transport répondait à une logique de « suivisme » vis-à-vis de la demande de mobilité dans tous les modes de transport. Par conséquent, seul le prix du carbone jouait dans l'évolution des technologies, sans influencer vraiment les choix modaux, comme nous l'avons vu ci-dessus. Dans cette nouvelle simulation, nous supposons que la Chine et l'Inde ont commencé à mettre en place, dès 2000, des politiques de maîtrise du développement des infrastructures en réallouant 50% des dépenses d'infrastructures du secteur routier vers le secteur *autres transports terrestres* (OT). Nous supposons que cette réallocation est neutre pour le budget national[134]. Cette politique correspond bien à un choix de bifurcation « non-mimétique » de l'organisation des transports dans les pays développés puisqu'elle suppose un évitement collectif de la domination du transport routier, grâce à un développement de villes et des infrastructures qui accord une place prioritaire aux transports en commun et aux modes « doux », simultanément à un contingentement du routier par les infrastructures.

Un premier indicateur de l'impact des ces politiques non-mimétiques est le nouveau profil du prix du carbone nécessaire pour respecter la même trajectoire de stabilisation à 450 ppm CO2-équivalent. En fait, ce n'est qu'à la fin du demi-siècle que le profil de taxe en Chine et en Inde ne se différencie véritablement de celui que le reste du monde doit mettre en place. Jusqu'en 2040, les profils de taxe en Chine et en Inde suivent la même croissance que le profil mondial, à 5 ou 10 $/tCO2 de différence, une faible marge de manœuvre permise par la croissance plus faible des émissions du transport routier. Au-delà de 2040, les profils de taxe marquent une inflexion significative grâce aux politiques d'infrastructures, puisqu'ils aboutissent à des valeurs de 320 et 300$/tCO2 respectivement

[133] Deux grandes initiatives existent pour la lutte contre le changement climatique au niveau de la ville : le programme Cities for Climate Protection de l'ICLEI – International Council for Local Environmental Initiatives, regroupant plus de 470 villes de taille variable ; le C40 - Climate Leadership Group, forum rassemblant 40 des plus importantes villes du monde pour organiser et diffuser les bonnes pratiques, avec le concours de la fondation Clinton.

[134] A vrai dire, nous ne disposons que de très peu d'informations sur les coûts relatifs des infrastructures, mais nous sommes conscients qu'il y a là un enjeu important de recherche et de modélisation.

en Chine et en Inde, au lieu de 460 $/tCO2 pour le reste du monde. De ce point de vue, les politiques de maîtrise des infrastructures de transport semblent surtout jouer un rôle à long terme, en évitant au prix du carbone de devoir croître pour limiter les transports en commun, selon un résultat similaire à celui que nous avions trouvé avec la version précédente du modèle (Crassous et al., 2006).

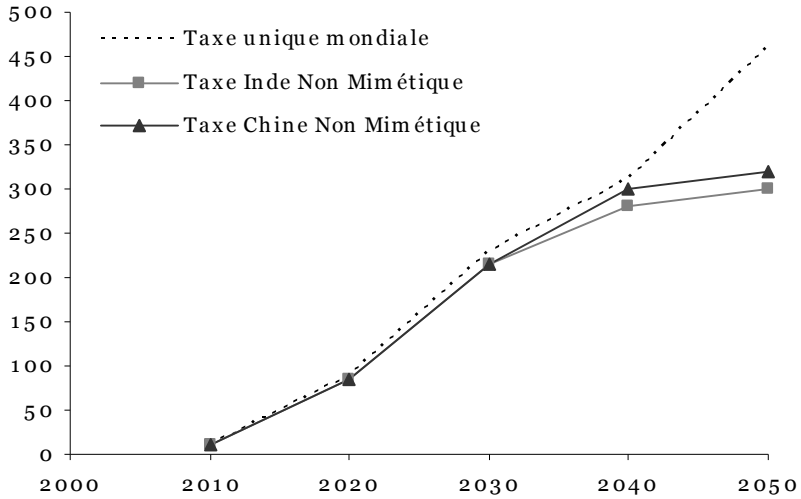


Figure 76 : Profils de prix du carbone en Chine et en Inde avec politiques d'infrastructures

Les politiques d'infrastructures font bifurquer la mobilité des ménages en Chine et en Inde de manière visible à partir de 2020, avec une substitution du transport collectif au transport en véhicules particuliers qui permet d'inverser la hiérarchie entre les deux modes.

En Chine, l'usage de la voiture individuelle ne croît que de 2.4% par an entre 2010 et 2050, au lieu de 4.5% par an dans le scénario mimétique, ce qui permet de limiter ce mode de transport à 1830 kilomètres par habitant et par an (contre 5620 dans le scénario mimétique). Les déplacements ainsi économisés se reportent en majeure partie (68%) vers les transports collectifs, dont l'utilisation individuelle croît de 5.5% par an pour atteindre 4000 kilomètres par an (contre 3.1% par an et 1400 kms dans le scénario mimétique). La réorientation des infrastructures, initiée dès le début de la période, permet ici de prendre le contre-pied de l'accroissement très rapide du trafic en véhicules particuliers. La diminution de mobilité due à ce report partiel est de 15%, mais notre niveau d'agrégation est beaucoup trop frustre pour traduire cette baisse de mobilité en gain ou perte de bien-être, étant donné qu'une réorganisation spatiale de cette ampleur modifierait considérablement les besoins de base en mobilité.

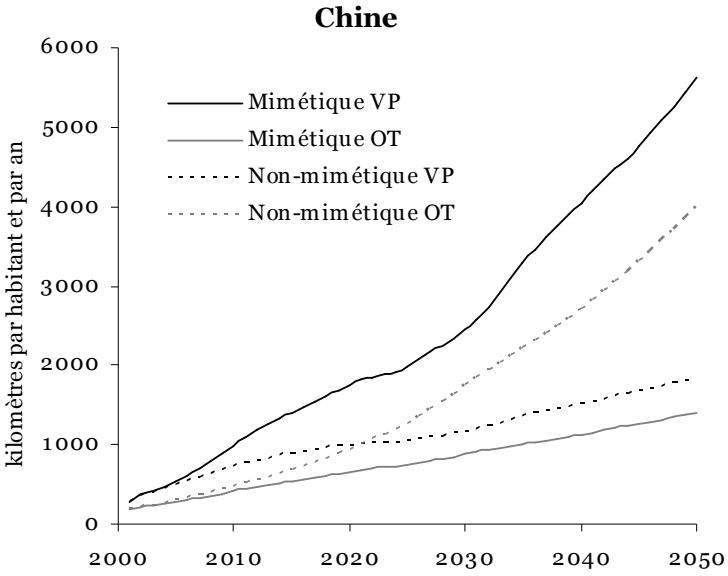


Figure 77 : Transport individuel en véhicules particuliers (VP) et transports collectifs (OT), scénarios mimétique et non-mimétique, Chine, 2000-2050

En Inde, la situation est différente puisque le partage modal est en faveur du transport collectif en début de période, avec 655 km/hab/an en transport en commun et seulement 144 km/hab/an en véhicule particulier[135]. Dans le scénario mimétique, l'attrait de la voiture individuelle fait croître très fortement la mobilité en véhicule particulier (+7% par an, 4490 km/hab/an en 2050), en stabilisant presque le recours aux transports collectifs (3800 km/hab/an en 2050). Les politiques d'infrastructures non-mimétiques aboutissent donc principalement à éviter cette explosion du trafic automobile, en maintenant la domination des transports collectifs, dont l'utilisation atteint 7000 km/hab/an, tandis que le recours aux véhicules particuliers est maintenu inférieur à 1000 km/hab/an pendant toute la période (avec une croissance limitée à 3.4% par an).

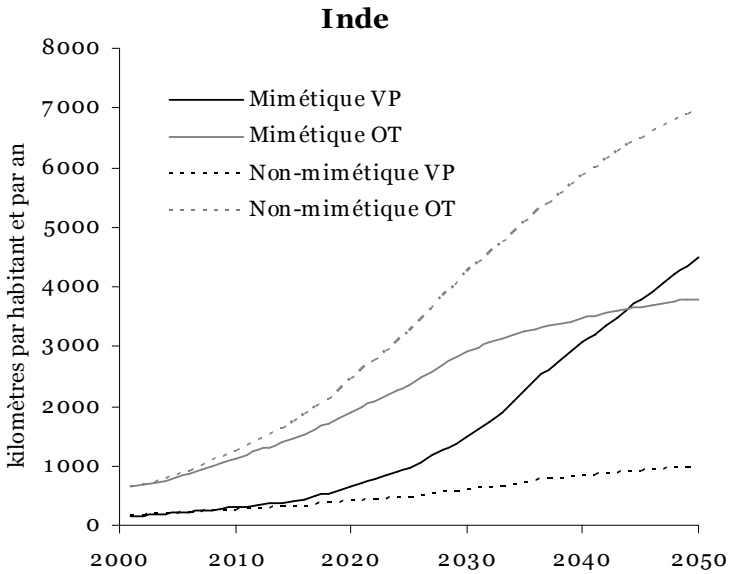


Figure 78 : Evolution de la mobilité en Inde – scénarios mimétique et non mimétique, 450 ppm CO_2-eq

[135] Ces chiffres ne prennent pas en compte la mobilité deux-roues très importante en Inde.

L'évolution de la mobilité des ménages dans le sens d'un report modal de la voiture vers les transports en commun se traduit par des changements notables des consommations directes de carburants liquides (Figure 79). Le scénario *mimétique* est caractérisé par une courbe de demande finale de carburants liquides similaire à la Figure 75, qui visait à expliquer les risques de re-décollage des émissions. Cette courbe comporte trois phases : une phase de croissance forte des consommations mue par le dynamisme de la mobilité et peu contraint par la taxe carbone, une phase de ruptures technologiques, dans laquelle la pénétration massive de véhicules hybrides et électriques permet de diminuer le recours aux carburants fossiles malgré la croissance continue des émissions, puis une dernière phase de redécollage de la demande de carburants lorsque les asymptotes techniques sont atteintes et que la mobilité poursuit sa croissance. Ce schéma s'applique aussi bien à la Chine qu'à l'Inde, dans des proportions différentes. Dans le scénario non-mimétique, une plus grande maîtrise de l'explosion du trafic permet de limiter le recours aux carburants fossiles et d'éviter le redécollage des émissions après 2035.

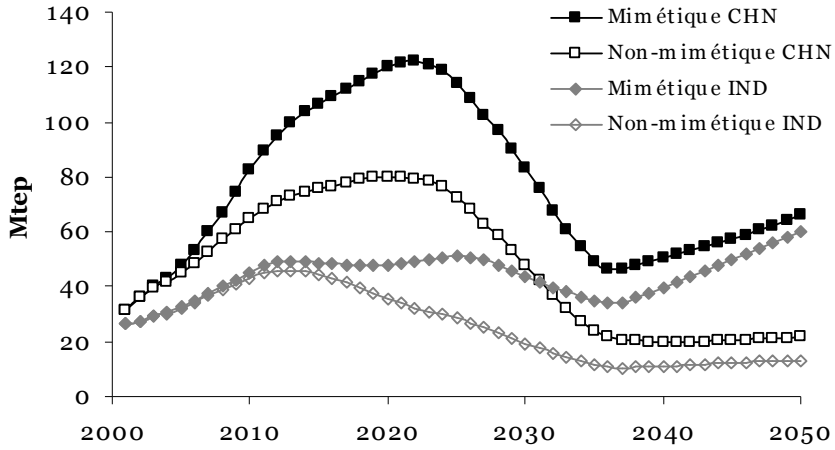


Figure 79 : Consommation finale des ménages en carburants fossiles

Il n'est cependant pas possible de transposer directement ces effets sur les trajectoires d'émissions. En effet, l'effet des politiques d'infrastructures sur les émissions du transport dépendra de deux éléments :

(i) les modes de transport collectif de substitution – dans notre simulation nous supposons que ces modes sont majoritairement électriques et que le transport de fret routier est aussi divisé par 2 en 2050, si bien que les émissions du secteur *transports terrestres* sont quasiment similaires dans les deux scénarios de réduction ;

(ii) la quantité de biocarburants dans les carburants liquides utilisés par les véhicules particuliers – dans notre simulation, la contribution des biocarburants est de 9% des carburants en 2030, 21% en 2040 et 35% en 2050 ; il faut diminuer d'autant l'économie réelle permise par les politiques d'infrastructures puisque la part assurée par les biocarburants est moins émettrice.

Ceci explique en partie l'effet modeste des politiques d'infrastructures sur le profil de la taxe carbone pendant les premières décennies. Ces politiques permettent d'économiser jusqu'à 115 Mt de CO2 en Chine en 2025 (2.5% des émissions nationales) et jusqu'à 65Mt CO2 en Inde en 2030 (4.5% des émissions nationales), alors que le prix du carbone est 5 à 15 $/tCO2 plus bas que dans le scénario mimétique entre 2010 et 2030. Dans le modèle, c'est le secteur industrie qui profite de ce relâchement

pour émettre les émissions économisées par le transport. Par contre, au-delà de 2040, les politiques non mimétiques évitent un redécollage de la demande de carburant, lequel redécollage nécessitait, dans le scénario mimétique, de poursuivre la hausse de la taxe jusqu'à 460 $/tCO2 en 2050. C'est donc lors de cette fin de période que le bénéfice des politiques d'infrastructures est le plus important.

Ce résultat peu paraître surprenant car intuitivement, on peut attendre beaucoup de la maîtrise du développement du transport routier. En fait, il faut resituer ces tests dans le contexte du scénario 450 ppm CO2-equivalent, qui est un scénario extrêmement rigoureux, exigeant des réductions massives et très rapides dans tous les secteurs de l'économie, avec deux conséquences importantes pour notre évaluation des politiques non-mimétiques :

(i) la trajectoire des émissions reste très sensible au prix du carbone dans les premières décennies ; tout relâchement de ce signal-prix en 2020 ou 2030 se traduit mécaniquement par une baisse des efforts dans de nombreux secteurs, ce qui explique que la maîtrise du transport en véhicule particulier a un impact relativement faible sur le signal-prix.

(ii) le secteur des transports est largement décarbonisé dans le scénario mimétique grâce à des hypothèses technologiques optimistes sur les véhicules hybrides et électriques ; par conséquent la différence entre les deux scénarios est moins visible.

Sans surprise, la faible différenciation des trajectoires de prix du carbone dans les deux scénarios n'est pas de taille à induire une image nettement différentes des bilans macroéconomiques es deux pays. Comme l'illustre la Figure 80, la forme du chronogramme des coûts n'est pas modifiée par les politiques d'infrastructures, mais le coût actualisé est tout de même réduit à 16.9% pour la Chine et 1.8% pour l'Inde, au lieu de 20% et 6.5% dans le scénario mimétique. En ajoutant cet effet aux effets de la différenciation et d'un recyclage affiné, il reste donc envisageable de ramener les coûts en dessous de 10% pour la Chine et probablement d'envisager un gain net pour l'Inde.

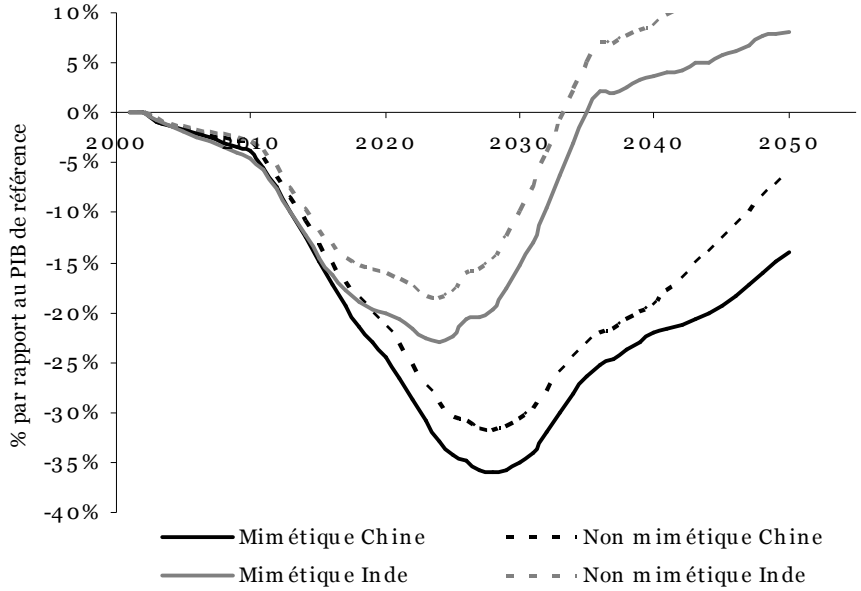


Figure 80 : bilan macroéconomique des politiques de réduction, scénarios mimétique et non-mimétique, Inde et Chine, 2000-2050

L'outil des politiques d'infrastructures peut finalement jouer un rôle multiple dans les stratégies de réduction :

- **réduction des coûts** : pour une enveloppe donnée d'émissions, il est susceptible de permettre une baisse de pression sur les autres secteurs de l'économie et d'améliorer le bilan macroéconomique tout au long de la trajectoire ;
- **couverture contre les incertitudes :** les politiques d'infrastructures constituent une stratégie de réduction des émissions robuste aux incertitudes sur les technologies et la croissance future puisqu'elle agit au niveau des niveaux des activités émettrices ;
- **prévention du risque de redécollage des émissions à long terme** : le report modal sur les transports collectifs limite les risques de redécollage des émissions lorsque les asymptotes technologiques ou physiques de décarbonisation sont atteintes dans le secteur automobile ou dans le domaine des agrocarburants[136] ;
- **cobénéfices locaux** : la limitation du trafic automobile permet d'améliorer considérablement la qualité de l'air et les conditions sanitaires des grandes agglomérations, un enjeu majeur des prochaines décennies dans de nombreuses villes dans les pays émergents souffrant déjà d'une pollution grave.

Cet exercice d'évaluation n'est qu'une ébauche d'une politique complète de bifurcation non mimétique, car notre scénario n'examine qu'une différenciation des choix d'infrastructures de transport routier. Par ailleurs, notre diagnostic sur l'Inde et la Chine devrait être validé par des experts nationaux, et confirmé par des tests de modèles régionaux plus désagrégés. Dans la lignée des autres simulations réalisées dans ce chapitre, nous utilisons encore le modèle IMACLIM-R comme un révélateur des questions que soulève la mise en œuvre de politiques climatiques plus complexes qu'un prix unique du carbone.

4 Conclusion

Certes, l'entreprise de réconciliation entre la théorie économique et le monde réel à laquelle ce chapitre tente de contribuer, dans le contexte particulier des politiques climatiques, dépasse largement le cadre de cette thèse. Nous n'aboutissons ici qu'à dégager des pistes de travail et d'évaluation des politiques de réduction. C'est bien là, cependant, qu'est la raison d'être de l'effort de modélisation qui sous-tend l'ensemble de notre travail : proposer un outil de représentation des trajectoires économiques qui permette de révéler numériquement les effets complexes de divers « paquets de politiques » dans un monde que l'on sait imparfait et hétérogène.

Partant d'une part du constat soulevé au chapitre précédent que l'instauration d'un prix unique du carbone peut générer des risques de ralentissement macroéconomique importants, d'autre part de l'incongruité du paradigme du prix unique par comparaison aux multiples initiatives de politiques de réduction qui émergent dans le monde réel, nous avons voulu suivre la piste de systèmes alternatifs. Cette piste se sépare elle-même en deux voies, compatibles mais indépendantes : premièrement, la différenciation des prix du carbone selon les régions ou les secteurs, et deuxièmement, le recours à une réorientation des infrastructures de transport et de l'organisation spatiale des activités.

[136] Cet effet est accentué dans les scénarios à 2100 développés dans la thèse simultanée d'Olivier Sassi (2008).

En ce qui concerne la différenciation, nous avons exposé des éléments de justification d'une différenciation des taxes régionales ou sectorielles, sans prétendre à aucune exhaustivité. Notre exposé démontre simplement, dans des cadres de pensée tout aussi théoriques que le modèle standard soutenant le paradigme d'une taxe unique, que certains éléments de réalisme économique peuvent justifient un abandon de la taxe unique. Nous avons ainsi montré que :

- la différenciation régionale est justifiée dès que l'on admet que les transferts de compensation nécessaires à compenser les différences de pertes d'utilité ne peuvent être mis en œuvre ;
- la différenciation sectorielle est justifiée dès que l'on suspend l'hypothèse d'anticipation parfaite des agents économiques, notamment sur l'inertie des réductions qu'ils peuvent réaliser.

L'évaluation des conséquences possibles de dispositifs de différenciation dans IMACLIM-R a ensuite effectivement permis de souligner l'intérêt potentiel de la différenciation. En particulier, nous avons mis en évidence des simulations dans lesquelles la différenciation induit une baisse des coûts globaux de réduction.

En ce qui concerne les politiques de développement « non-mimétique » pour les pays émergents, et en particulier pour les infrastructures de transport, nous avons mis en évidence qu'elles présentent un intérêt pour (i) renforcer la robustesse des stratégies de réduction des émissions, (ii) diminuer la pression sur les autres secteurs de l'économie et donc les coûts totaux de réduction, (iii) éviter le re-décollage à long terme des émissions du transport. Cette analyse est largement incomplète parce qu'elle nécessite de pousser la logique de l'outil IMACLIM-R plus loin que son développement actuel, avec une représentation plus précise des déterminants des transports, de la structure des villes, et des dynamiques d'équipements.

D'un point de vue politique, il faut reconnaître que le chiffrage du coût de ces stratégies de bifurcation reste très incertain, et les hypothèses introduites dans le modèle à ce titre sont très frustres. S'il est envisageable de collecter des données techniques partielles sur le coût des infrastructures ou de la rénovation des bâtiments, il reste très difficile d'évaluer les coûts cachés des régulations d'urbanisme, des dispositifs de zonage du territoire ou d'une réorganisation commerciale et industrielle. En corollaire, les besoins massifs de financement des infrastructures et des équipements qui sont liés à de telles politiques de réorientation des tendances « mimétiques » naturelles de l'économie restent très incertains aussi. Pour réussir les bifurcations vers des trajectoires soutenables dont il est question ici, l'enjeu majeur sera donc de sécuriser la réorientation de larges flux investissements publics et privés vers les infrastructures souhaitées, par exemple en modifiant les signaux économiques qui favorisent la domination du transport routier et l'étalement urbain dans les scénarios « mimétiques ».

Références

Agarwal, A., Narain, S., 1991. *Global Warming in an Unequal World, a case of environmental colonialism*. Center for Science and Environment, Delhi

Babiker, M.H., Bautista, M. E., Jacoby, H. D., Reilly, J. M., 2000, "Effects of differentiating climate policy by sector: A United States Example", Report No 61, MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change.

Blanchard O., Criqui, P., Trommetter, M., Viguier, L., 2000, "Au-delà de Kyoto: enjeux d'équité et d'efficacité dans la négociation sur le changement climatique", *Economie et Prévision*, 143

Böhringer, C., Rutherford, T.F., 2002, "In search of a rationale for differentiated environmental taxes", ZEW, discussion paper 02-30

Bye, B., Nyborg, K., 2003, "Are Differentiated Carbon Taxes Inefficient? A General Equilibrium Analysis", *the Energy Journal* 24 (2), 95-112.

Chichilnisky, G., Heal, G. M., 1994, "Who should abate carbon emission? An international perspective", *Economics Letters*, 44, 443-9

Claussen, E., McNeilly, L., 1998, "Equity and Global change: The complex elements of global fairness", Pew Center on Global Climate Change, 39 p.

Copeland, B. R., Taylor, M. S., 2004, "Trade, Growth, and the Environment", *Journal of Economic Literature*, 42(1), 7-71

Demailly, D., Quirion, P., 2005, "Leakage from climate policies and border tax adjustment: lessons from a geographic model of the cement industry", CESifo, David Bradford memorial conference on the design of climate policy, Venice, July.

Den Elzen M., Berk, M., Schaeffer, M., Olivier, J., Hendriks, C., Metz, B., 1999, "The Brazilian Proposal and other Options for International Burden Sharing: an evaluation of methodological and policy aspects using the FAIR Model", *RIVM Report No. 728001011*, Bilthoven.

Ghersi, F., 2003, "*Changement technique et double dividende d'écotaxes : un essai sur la confluence des prospectives énergétique et macro-économique*", Thèse de Doctorat : Sciences Economiques : Hourcade J-C (dir.) : Paris, EHESS, 289 p.

Gilotte, L., 2004, *Incertitude, inertie et choix optimal. Modèles de contrôle optimal appliqués au choix de politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre*, Thèse de Doctorat : SCI. ECON. (Analyse et Politique Économiques) : De Lara, M.(dir.) : Paris, ENPC (Ecole Nationale des Ponts et Chaussées), 175 p.

Gitz, V., 2004, "*Changement d'usage des terres et politiques climatiques globales*", Thèse de Doctorat, Science de l'environnement : Hourcade J-C, (dir.) : Paris, ENGREF, 450 p.

Goulder L., Mathai, K., 2000, "Optimal CO2 abatement in the presence of induced technical change", *Journal of Environmental Economics and Management*, 39, 1-38

Groenenberg H., Phylipsen, P., Blok, K., 2000, "Differentiating commitments world wide: global differentiation of GHG reductions based on Triptych approach - a preliminary assessment", *EnergyPolicy*, 29, 1001-1030

Ha Duong, M, Grubb, M.J., Hourcade. J.-C., 1997, "Influence of socioeconomic inertia and uncertainty on optimal CO2-emission abatement". *Nature*, 390, 270-274

Hoel, M., 1996, "Should a carbon tax be differentiated across sectors", *Journal of public economics*, 59(1), 17-32

Hourcade, J.-C., Gilotte, L., 2000, “Differentiated or uniform international carbon taxes: Theoretical evidences and procedural constraints”, in Chichilnisky, G. et Heal, G. (eds.) *Environmental Markets*, New York, Columbia University Press, Chap. 8

Hourcade, J.C., Shukla, P.R., Mathy, S. , 2005, “Untying the Climate - Development Gordian Knot : Economic options in a politically constrained world”, David F. Bradford Memorial Conference on “the design of climate policy”, 22-23 juillet 2005, Venice International University, San Servolo.

Jacoby H.D., Schlamensee, R., Wing, I. S., 1999, “Toward a Useful Architecture for Climate Change Negotiations”, *Joint Program on the Science and Policy of Global Change Report No.49*, MIT, Cambridge

Jansen J.C., J.J. Battes. J.P.M. Sijm, C.H. Volkers, J.R. Ybema, 2001, “The multi-sector convergence approach, A flexible framework for negotiating global rules for national greenhouse gas emissions mitigation targets”, *CICERO Working Paper 2001:4, Oslo*

Laffont, J. J., 1977, *Effets externes et théorie économique*, Paris: Editions du CNRS

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), 539-555

Lecocq, F., Crassous, R., 2003, “International Climate Regime beyond 2012: Are Quota Allocation Rules Robust to Uncertainty?”, *Policy Research Working Paper* 3000, World Bank, Washington D.C.

Lecocq, F., Hourcade, J.-C., 2003 “Equitable provision of long-term public goods: the role of negotiation mandates”, *Policy Research Working Paper Series* 3180, The World Bank, Washington D.C.

Negishi, T., 1960, “Welfare economics and existence of an equilibrium for a competitive economy”, *Metroeconomica*, 12, 92-97

Oliveira Martins, J., Sturm, P., 1998, “Efficiency and Distribution in Computable Models of Carbon Emission Abatement”, OECD Economics Department Working Papers 192, OECD Economics Department

Prins, G., Rayner, S., 2007, “Time to ditch Kyoto”, *Nature* 449, 973-975

Reiner, D. M., Jacoby H.D, 1997, “Annex I differentiation proposals: implications for welfare, equity and policy”, *Joint Program on the Science and Policy of Global Change Report No.27*, MIT, Cambridge

Ringius L., Torvanger, A., Holtsmark, B., 1998, “Can multi-criteria rules fairly distribute climate burdens - OECD results from three burden sharing rules”, *Energy Policy* 26(10), 777-793

Ringius, L., Torvanger, A., Underdal, A., 2000, “Burden differentiation: fairness principles and proposals”, Working Paper, 13, Center for International Climate and Environmental Research, Oslo

Sen, A. K., 1992, *Inequality Reexamined*, Harvard University Press

Conclusion générale

La question du changement climatique place notre humanité moderne devant un défi vertigineux. Nous n'avons probablement jamais fait face, collectivement, à une mise en évidence aussi globale de la force d'impact des activités humaines sur la qualité de notre environnement. Nous avons encore le temps de limiter une évolution trop rapide du climat qui nous déplacerait dans un nouvel environnement a priori très dégradé et dont nous ignorons en partie le fonctionnement. Mais dans l'état actuel des connaissances scientifiques, il apparaît que cette possibilité d'action collective exige une bifurcation généralisée de nos modes de production et de consommation dans les deux à trois prochaines décennies, afin de faire décroître les émissions mondiales de GES. Mais cela fait déjà presque 30 ans qu'une large communauté scientifique mondiale pluridisciplinaire s'est saisie du dossier à plein temps et plus de 15 ans que la sphère politique a amorcé le temps de la mobilisation, sans que la bifurcation identifiée comme nécessaire ne soit encore observable. Face à cette inertie collective, notre capacité de prospective et d'évaluation *ex ante* des politiques publiques est un élément critique pour relever le défi à temps et de la manière la plus efficace possible, en parallèle du traitement des nombreuses autres difficultés économiques et sociales auxquelles nos sociétés font face, souvent à des horizons moins éloignés, donc apparemment prioritaires. C'est cet enjeu de la prospective et de l'évaluation économique de long terme, générateur d'un double défi intellectuel et politique, qui a constitué la motivation et la ligne directrice de notre travail. Parvenus au terme de cette thèse, nous souhaitons dresser le bilan de ce qui a été réalisé et en esquisser les prolongements.

Au commencement de cette thèse et tout au long de sa réalisation, nous avons été orientés par un « héritage » de départ décisif, constitué d'une insatisfaction chronique vis-à-vis des modèles de la boîte à outils des économistes pour traiter de la question des trajectoires macro-énergétiques à long terme. Le projet était de répondre à cette insatisfaction en proposant un outil innovant, une ambition qui ne nous aurait pas semblé réalisable sans l'enthousiasme convaincant, voire légèrement hypnotisant, de notre directeur de thèse. Pour mener à bien ce projet, il a été nécessaire de s'approprier progressivement cet « héritage d'insatisfaction », en analysant les outils existants sans se laisser convaincre par eux, parce qu'il aurait été probablement impossible de répondre à l'insatisfaction de départ en prenant pour base la structure ou les principes des outils courants. Chronologiquement, cette thèse a en fait commencé au chapitre 3, par la conception laborieuse du modèle IMACLIM-R, à partir d'idées diffuses investies dans de précédents exercices de modélisation au CIRED. Progressivement, c'est la nécessité de justifier solidement nos choix de structure et de représentation qui nous a conduit à confronter ces choix aux modèles existants, à leur propre cohérence et à leurs solides acquis. Ainsi, les deux premiers chapitres résultent moins d'un diagnostic formalisé en début de la thèse que d'une maturation progressive de « l'héritage d'insatisfaction », motivée par la justification de notre propre outil par rapport à l'existant. Bien que présentés dans cette thèse comme l'amorce de notre travail, ils témoignent donc plutôt d'un diagnostic *final* sur la boîte à outils disponible.

Nous retenons de ce diagnostic quatre observations principales. *Premièrement*, l'analyse du paysage des modèles actuels montre qu'il est composé de 4 à 5 paradigmes de modélisation, stabilisés et construits sur les modèles historiques et continuant de coexister sans qu'il n'y ait de supériorité affirmée entre eux (Chapitre 1). *Deuxièmement*, la représentation de la croissance économique uniquement comme un processus équilibré à long terme occulte largement l'analyse des transitions pourtant cruciale dans la bifurcation des systèmes énergétiques. *Troisièmement*, la représentation de l'évolution des systèmes techniques doit être le lieu d'une hybridation entre possibilités techniques identifiées et effets d'équilibre général, ce qui exige « d'ouvrir la boîte » de la fonction de production agrégée. *Quatrièmement*, il faut rapprocher la représentation des modèles des imperfections et de

l'hétérogénéité du monde réel, en particulier en tenant compte de l'existence d'anticipations imparfaites, de comportements sous-optimaux et des hétérogénéités infra régionales – revenu, localisation, préférences, etc. (Chapitre 2). La composition de ce diagnostic est systématiquement double, car chacune de ces observations a une portée méthodologique, liée à des arbitrages délicats entre théorie économique et représentation quantitative – ce que Robert Solow appelait de ses vœux sous le vocable « d'opportunisme méthodologique » – et une portée politique, parce que les principes de représentation encapsulés dans les modèles sont déterminants pour le contenu de l'expertise d'évaluation des politiques énergétiques et climatiques.

Véritable squelette de cette thèse, le développement du modèle IMACLIM-R a débouché sur des pistes de réponse à ce diagnostic. Outil de simulation des trajectoires macro-énergétiques de long terme, il est conçu dès le départ comme un lieu d'articulation cohérente des mécanismes de croissance, des contraintes de l'équilibre général, des possibilités technologiques et des spécificités de comportements des agents économiques. Par extension, ce cadre de mise en cohérence est un outil *d'intégration* d'informations extérieures disparates, venant de modèles préexistants ou de dires d'experts, et *de dialogue* autour du calcul des trajectoires complexes. Enfin, sur le plan de l'évaluation des politiques énergétiques et climatiques, nous avons cherché à représenter dans une même architecture les ajustements de court terme et les forces motrices de long terme, pour être en mesure de proposer l'analyse des transitions, désespérément absente de la littérature actuelle.

Le développement de ce modèle ouvre un large champ de possibles, certains dans l'état d'avancement du modèle, d'autres nécessitant des aménagements ultérieurs. Les trois derniers chapitres de la thèse répondent en premier lieu à la question du changement climatique, mais ils remplissent aussi le rôle collatéral d'une démonstration partielle des capacités du modèle. Le lecteur aura eu dans ces chapitres, nous l'espérons, un exposé de ces capacités, plus parlant et plus facilement intelligible qu'à travers les deux chapitres austères de présentation du modèle. Le chapitre 5 permet ainsi d'illustrer le rôle de mise en cohérence et d'intégration du modèle, autour de la projection d'une trajectoire sans politiques carbone. Le chapitre 6 permet de rendre compte de l'importance de cette mise en cohérence dans la simulation des contraintes physiques ou macroéconomiques qui bornent l'espace des possibles et il amorce une analyse approfondie de la transition vers une économie décarbonisée. Le chapitre 7 approfondit le rôle du modèle comme outil d'aide à la décision placé entre les préconisations théoriques compactes et l'hétérogénéité complexe du monde économique réel.

Venons-en au fond des résultats présentés dans ces trois chapitres et à ce qu'ils nous apprennent quant à la définition d'une stratégie collective face au changement climatique.

Le Chapitre 5 fait écho à une intuition et à de récentes inquiétudes diffuses dans la communauté scientifique concernant les risques de croissance soutenue des émissions de GES dans le futur. Notre intuition, formée par l'expérience des nombreuses simulations réalisées avec le modèle en dehors du cadre strict de cette thèse, était qu'il existe dans l'économie mondiale de puissantes forces motrices qui viendront alimenter la croissance des émissions. Parmi ces forces, il y a (i) des besoins de mobilité loin d'être saturés partout dans le monde, (ii) une aspiration de masse au progrès et au confort dans les pays émergents et les pays en développement très peuplés, avec de larges marges de rattrapage des niveaux d'équipements consommateurs d'énergie par rapport aux pays de l'OCDE, (iii) de larges marges de rattrapage économique susceptibles de soutenir une croissance forte dans les pays émergents et en développement, moteur d'une explosion de la demande en infrastructures et en matériaux. En tenant compte de ces forces motrices, nous avons obtenu une trajectoire d'émissions fortement croissante d'ici 2050, génératrice d'une accélération du changement climatique empêchant toute stabilisation du climat d'ici la fin du siècle. Avec ces résultats se profile un certain pessimisme

sur nos réelles capacités mondiales à entamer une réduction absolue des émissions mondiales à partir de 2015 ou 2020 – point de pivot qui correspond aux ambitions européennes du +2°C. En effet, les forces motrices que nous évoquons ne peuvent être légitimement freinées, puisqu'il s'agit d'un accès généralisé au développement moderne. Au mieux, il sera souhaitable d'accompagner ces dynamiques de manière à favoriser la production la plus efficace et la moins émettrice possible des services énergétiques dont la demande va logiquement continuer à exploser, à travers des progrès technologiques orientés, une gestion optimisée de l'organisation du territoire et des zones urbaines, une planification adaptée des infrastructures.

Le Chapitre 6 s'attaque justement à l'étude de scénarios de contrôle des émissions. Dans un premier temps, les termes de ce contrôle sont simples pour faciliter l'analyse : une enveloppe d'émissions mondiales à respecter et un système de taxation uniforme sans redistribution mondiale des revenus de la taxe. Nos simulations confirment un message fort du GIEC : techniquement, si les technologies aujourd'hui connues, opérationnelles et en expérimentation (incluant la capture du CO_2), sont progressivement disponibles avant 2050, il semble possible de réduire les émissions suffisamment et à temps pour stabiliser les concentrations de GES à 450 ppm CO_2-eq, et avoir toutes les chances de ne pas dépasser en 2100 une augmentation de 2°C de température moyenne par rapport à l'équilibre pré-industriel. Bien sûr, ce résultat est incomplet si l'on ne précise pas à quel coût il peut être réalisé et c'est sur ce point que les résultats obtenus se démarquent considérablement des évaluations standard de la littérature actuelle.

Premièrement, le profil de valeur du carbone nécessaire pour respecter l'enveloppe d'émissions pour 450 ou 550 ppm CO_2-eq se démarque du profil exponentiel préconisé par la théorie du contrôle optimal : il apparaît nécessaire de faire croître rapidement la valeur du carbone dans les deux premières décennies, avant de la stabiliser (cas 550 ppm CO_2-eq) ou de la laisser croître linéairement (cas 450 ppm CO_2-eq) jusqu'en 2050. L'inertie du capital existant et des technologies carbonées qu'il contient oblige à recourir sans délai à des technologies non carbonées dans les nouveaux équipements. Cela ne peut se faire sans afficher rapidement un signal prix suffisant.

Deuxièmement, ce profil de valeur du carbone, quand il est mis en œuvre à travers une taxe uniforme, peut impliquer des coûts de transition élevés, impliquant une croissance économique moins dynamique pendant 20 ans. Les pays dont les économies sont les plus intenses en CO_2 – Chine, Inde, CEI – sont les plus touchés par ces coûts de transition, car ceux-ci sont liés au fardeau de la taxe uniforme sur ces économies dont la décarbonisation est limitée par le rythme de renouvellement des équipements. Après deux décennies de transition, le bénéfice de la décarbonisation prend le dessus sur le fardeau résiduel de la taxe, et les économies bénéficient d'un rattrapage de croissance grâce à une situation énergétique préférable à celle du scénario de référence. En 2050, la plupart des économies ont la capacité de dépasser le niveau de PIB du scénario de référence à la même date, grâce aux co-bénéfices de la politique de réduction des émissions de GES en matière de réduction de la facture énergétique et des importations d'énergies fossiles. Logiquement, les pays dont l'économie repose en partie importante – OPEP et Russie notamment – sur des exportations d'énergie fossile sont durablement pénalisés par la baisse de leurs revenus d'exportations.

Notre évaluation du coût du respect de la contrainte du profil d'émissions est significativement différente des évaluations présentes dans la littérature et synthétisées par le GIEC, qui affiche qu'une stabilisation à 550 ppm CO2-eq ne ralentirait pas l'économie mondiale de plus de 2.5% du PIB à l'horizon 2030 et de plus de 4% du PIB en 2050. Nous avons clairement expliqué pourquoi nos résultats sont différents : nous représentons un monde avec des anticipations limitées et une forte inertie des technologies et du capital installé, et dans lequel les forces motrices principales de la demande de services énergétiques sont peu sensibles au prix du carbone. Mais à cause de cet écart

avec les évaluations courantes, la présentation de nos chiffres de coûts de transition appelle une certaine prudence d'interprétation. Nous voulons éviter au lecteur pressé d'en conclure que la stabilisation du climat coûte trop cher pour être entreprise rapidement, en l'invitant à réfléchir à la conception d'un régime de coordination internationale des efforts minimisant les coûts de transition.

Il nous semble en effet que l'urgence de la mise en place d'un régime de coordination efficace pour le post-Kyoto exige de mettre fin à deux incompréhensions tenaces entre les économistes et les décideurs, incompréhensions qui biaisent les négociations depuis de nombreuses années. Nous avons souligné à plusieurs reprises la *première incompréhension* sur les coûts de réduction : d'un côté les économistes confirment leur diagnostic en produisant des scénarios de stabilisation sans heurts qui ne coûtent que quelques points de PIB à l'horizon 2050, de l'autre les décideurs politiques craignent tous de soumettre leur économie à un contrôle généralisé des émissions de GES, ce qui signifie qu'ils ont une vision implicite des coûts beaucoup plus pessimiste. Comme conclure au caractère obtus de tous les dirigeants politiques ne peut pas constituer une échappatoire satisfaisante, il faut évidemment se concentrer sur les raisons de cette incompréhension, révéler les sources de coûts implicites derrière les craintes des décideurs et apporter la preuve que tel ou tel système de régulation permettra d'éviter ces risques de coûts élevés. La *seconde incompréhension* porte sur la nécessaire construction d'un paquet cohérent et performant de politiques et mesures visant à atteindre des objectifs de réduction donnés à un coût minimal. D'un côté les économistes ne se lassent pas de réaffirmer que l'égalisation des coûts marginaux est un prérequis pour garantir l'efficacité et qu'il faut donc mettre en œuvre une taxe uniforme ou un système de quotas échangeables ; de l'autre les décideurs font face à des économies très hétérogènes, dans lesquels la prise de décision est rendue complexe par les fiscalités préexistantes, les spécialisations sectorielles et les autres objectifs politiques, avec un arsenal d'instruments de régulation bien plus large que le duo taxes / permis. Entre les préconisations compactes de la théorie économique dans un monde de premier rang et l'hétérogénéité du monde réel, nous devons trouver un moyen de mettre en œuvre un dialogue plus *opérationnel*.

C'est à partir du constat de ces deux incompréhensions et de l'identification des risques de coûts de transition élevés dans un système de taxe uniforme mondial que nous avons construit le septième et dernier chapitre. Loin de proposer une solution définitive à la réduction des incompréhensions, il aborde plusieurs pistes d'élaboration d'un système de coordination plus complexe, à la fois au niveau international et à l'intérieur de chaque région ou pays, dans le but de limiter les risques de coûts de transition. Au niveau international, nous rappelons qu'une différenciation régionale des prix du carbone est justifiée par une approche classique d'économie publique, mais nous soulignons qu'elle ne permettrait pas à elle seule de gérer la tension entre réduction des coûts dans les régions les plus vulnérables aux coûts de transition et réalisation d'une contrainte globale rigoureuse. Au niveau infranational nous montrons qu'il est pertinent d'envisager (i) une différenciation sectorielle qui tient compte des hétérogénéités d'inerties et d'anticipations des secteurs, (ii) une politique complémentaire de planification des infrastructures et de l'organisation spatiale des territoires (iii) une optimisation du mode de recyclage des recettes pour compenser les agents les plus touchés par les coûts de transition en limitant l'effet rebonds sur les émissions. Les simulations que nous avons réalisées dans ce chapitre sont autant d'invitations à approfondir, dans des modèles de second rang comme IMACLIM-R, l'évaluation de stratégies alternatives au paradigme du seul prix unique du carbone. Les résultats obtenus à partir de ce premier jeu de simulations, dont on peut raffiner considérablement les modalités dans chaque région, laissent penser qu'il est possible, grâce aux différents leviers d'action proposés, de ramener les coûts de transition à un niveau comparable à celui des évaluations recensées par le GIEC. Mais nous soutenons ici la thèse que nous ne parviendrons pas à formuler une réponse aussi

performante au défi du changement climatique par une politique qui se résume à la mise en œuvre progressive d'un prix exponentiel et uniforme du carbone.

En proposant ce diagnostic à notre lecteur, nous avons pleinement conscience que la démonstration n'est que partielle, car il reste un travail important d'analyse précise des moyens d'assurer une transition mondiale vers une économie peu intense en GES, à un coût faible et de manière robuste aux incertitudes. Les jalons posés dans le dernier chapitre sont autant de pistes prometteuses pour cela : politiques d'infrastructures, optimisation du recyclage des revenus des instruments d'incitation à la réduction des émissions, différenciation des prix, etc. Cette entreprise constituera l'un des axes principaux de poursuite de nos travaux ; elle est d'autant plus motivante qu'elle conduit à de plus en plus de proximité entre la recherche que nous développons et la prise de décisions. En fait elle permettrait de combler un vide persistant entre les modélisateurs du long terme et les décideurs politiques, à cause du manque d'expertise solide sur la transition[137]. La décennie à venir doit être le temps de la mise en œuvre d'actions concrètes de réduction des émissions à l'échelle mondiale, si bien que l'intérêt d'une expertise robuste sur les paquets de politiques et mesures efficaces pour induire la bifurcation souhaitée ne fait aucun doute. Cela concerne autant la définition des politiques et mesures domestiques que la progression de la coordination internationale, comme nous l'avons souligné en montrant que le coût de la transition dépend à la fois des mécanismes d'accompagnement internes à chaque pays et des modalités de coordination internationale.

Le second axe de poursuite des travaux engagés au cours de cette thèse est de progresser dans la représentation du monde réel, dans la lignée des propositions que nous avons proposées dans le chapitre 2. Un certain nombre d'innovations ont été introduites dans le modèle présenté ici, mais nous restons frustrés de n'avoir pu pousser nos efforts plus loin, sur plusieurs points :

- les déséquilibres chroniques de financement des économies, y compris l'évolution de la dette des états et les dynamiques de court et long terme des flux de capitaux, dont l'importance est cruciale pour détecter les obstacles ou les opportunités de financement des investissements de réduction des émissions ou d'adaptation au changement climatique ;
- les inégalités infrarégionales, entre zones urbaines et zones rurales, entre différentes classes de revenu, qui constituent une dimension encore inexplorée des politiques énergétiques et climatiques[138] ;
- l'évolution des usages des sols, et en particulier la compétition entre alimentation, bioénergie, séquestration et préservation des écosystèmes ;
- la rétroaction du climat sur l'économie, susceptible de modifier profondément la comparaison entre scénarios « laissez-faire » et scénarios de stabilisation.

Si le temps de cette thèse aura été en majeure partie dédié à la modélisation – et l'on imagine volontiers que les nombreuses pistes de développement du modèle esquissées ci-dessus demanderaient à nouveau plusieurs années – nous avons constamment gardé à l'esprit que ces efforts trouvaient leur justification dans l'aide à la décision qu'ils permettraient de fournir. De ce point de vue là, nous avons longtemps ressenti la frustration d'être encore loin de disposer d'un outil opérationnel, fournissant des

[137] Dans le contexte de ce « vide » d'expertise de la transition, les seuls experts qui ont quelque chose à dire sur le court ou moyen terme sont les spécialistes du marché du carbone: cela comporte un risque dans la mesure où ce marché n'est qu'un instrument parmi d'autres, qu'il ne peut générer toutes les réductions requises, et qu'il génère des problèmes de transition de la même manière que la taxation uniforme.

[138] Pour rentrer plus dans le détail des politiques et mesures nationales, une version nationale du modèle en économie ouverte est en cours de développement au CIRED

résultats directement exploitables par les décideurs. Il importe maintenant de mettre cette architecture résolument au service de l'aide à la décision, ce d'autant plus que l'aboutissement de cette thèse coïncide dans le temps des négociations du régime post-Kyoto et de la mise en œuvre de politiques domestiques dans de nombreux pays. La formation d'une équipe plus étoffée autour du modèle IMACLIM-R, ainsi devenu un outil collectif, est un atout pour cela, mais elle exige maintenant de modifier profondément nos habitudes de travail, en passant d'une logique de développement intuitive à deux ou trois à une organisation d'équipe optimisée pour articuler dans le même temps la transmission, le développement numérique, la recherche théorique, l'expertise auprès des décideurs et la diffusion des résultats obtenus.

Bibliographie générale

Abramovitz, M., 1986, "Catching up, Forging Ahead, and Falling Behind", *Journal of Economic History*, XLVI, 2, 385-406

Agarwal, A., Narain, S., 1991. *Global Warming in an Unequal World, a case of environmental colonialism*. Center for Science and Environment, Delhi

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

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

AIE, 2006, *Energy Technology Perspectives: Scenarios and Strategies to 2050*, IEA/OCDE, Paris

AIE, 2004, *World Energy Outlook*, IEA/OCDE, Paris

Akerlof, G. A., 2007, "The Missing Motivation in Macroeconomics", *American Economic Review* 97(1), 5-36

Alcamo, J., Kreileman, G.J.J., Krol, G.J.J., Zuidema, G., 1994, "Modeling the global society-biosphere-climate system: Part 1: Model description and testing", in *Image 2.0: Integrated Modeling of Global Climate Change*, J. Alcamo (ed.), 1-35, Kluwer Academic Publishers.

Ambrosi, P., 2004, "*Amplitude et calendrier des politiques de réduction des émissions face aux risques climatiques : leçons des modèles intégrés"*, Thèse de Doctorat, Sciences Économiques, Hourcade, J-C (dir.), Paris, EHESS, 375 p.

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

Arrow, K. J., 1978, "The Future and the Present in Economic Life", *Economic Inquiry*, 16(2), 157-69

Arrow, K. J., Debreu, G., 1954, "The Existence of an Equilibrium for a Competitive Economy", *Econometrica*, vol. XXII (3), 265-90.

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

Babiker, M.H., Bautista, M. E., Jacoby, H. D., Reilly, J. M., 2000, "Effects of differentiating climate policy by sector: A United States Example", Report No 61, MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change.

Baily, M. N., Solow, R. M., 2001, "International Productivity Comparisons Built from the Firm Level", *Journal of Economic Perspectives*, 15(3), 151-172

Bardi, U., 2005, "The mineral economy: a model for the shape of oil production curves", *Energy Policy* 33, 53-61

Barker, T., Pan, H., Köhler, J., Warren, R. and Winne, S., 2006, "Decarbonizing the Global Economy with Induced Technological Change: Scenarios to 2100 using E3MG", In Edenhofer, O., Lessmann, K., Kemfert, K.,

Grubb, M. and Köhler, J. (eds) *Induced Technological Change: Exploring its Implications for the Economics of Atmospheric Stabilization*, Energy Journal Special Issue on the International Model Comparison Project

Baron, R., Hourcade, J.C., 1994, "The bottom-up versus top-down controversy, a useful provocation for economic research on environment and technological change", 50th Congress of the International Institute of Public Finance "Public Finance, Environment and Natural Ressources", Harvard University, 22-25 août, 11 p.

Baron, R., Salles, J. F., 1991, "*Comparaison des travaux de prospective énergétique à long terme et évaluation de différents scénarios relatifs au problème de l'effet de serre*", Rapport de recherche auprès du Ministère de l'Environnement, 163 pp., INIST-CNRS

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

Barro, R. J., 1990, "Government Spending in a Simple Model of Endogenous Growth", *Journal of Political Economy*, 98(5), 103-126

Bentley, R.W., 2002, "Global oil & gas depletion: an overview", *Energy Policy* 30(3), 189-205

Bernanke, B., Jorgenson, D., 1975, "The Integration of Energy Policy Models", *Computers and Operations Research* , Vol. 2, No. 3, September 1975

Bernard, A.B., Jones, C.I., 1996a, "Comparing apples to oranges: productivity convergence and measurement across industries and countries", *American Economic Review*, 86, 1216–1252

Bernard, A.B., Jones, C.I., 1996b, "Technology and Convergence", *The Economic Journal*, 106(437), 1037-1044

Blanchard O., Criqui, P., Trommetter, M., Viguier, L., 2000, "Au-delà de Kyoto: enjeux d'équité et d'efficacité dans la négociation sur le changement climatique", *Economie et Prévision*, 143

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

Blaug, M., 2001, "No history of ideas, please, we're economists", *Journal of Economic Perspectives*, 15(1), 145-164

Böhringer, C., Löschel, A., 2006, "Promoting Renewable Energy in Europe: A Hybrid CGE Approach", *The Energy Journal*, Special Issue "The Hybrid Modelling: New Answers to Old Challenges", 123-138

Böhringer, C., Löschel, A., 2005, ",Climate Policy Beyond Kyoto: Quo Vadis? A Computable General Equilibrium Analysis Based on Expert Judgments", *Kyklos*, 58(4), 467-493

Böhringer, C., Rutherford, T. F., 2008, "Combining bottom-up and top-down", *Energy Economics*, 30, 547-596

Böhringer, C., Rutherford, T.F., 2002, "In search of a rationale for differentiated environmental taxes", ZEW, discussion paper 02-30

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

Bosetti, V., C. Carraro, M. Galeotti, E. Massetti, M. Tavoni, 2006, "WITCH: A World Induced Technical Change Hybrid Model", *The Energy Journal*, Special Issue "Hybrid Modelling of Energy Environment Policies: Reconciling Bottom-up and Top-down", 13-38

Boulding, 1971, "After Samuelson Who Needs Adam Smith?", *History of Political Economy*, 3(2), 225-237

Burniaux J. M., Martin, J. P., Nicoletti, G., Oliveira Martins, J., 1991, "GREEN - A Multi-Region Dynamic General Equilibrium Model for Quantifying the Costs of Curbing CO2 Emissions: A Technical Manual", OECD Economics Department Working Papers 104, OECD Economics Department

Bye, B., Nyborg, K., 2003, “Are Differentiated Carbon Taxes Inefficient? A General Equilibrium Analysis”, *the Energy Journal* **24** (2), 95-112.

Carraro, C., Siniscalco, D., 1997, “R&D cooperation and the stability of international environmental agreements”, in: Carraro, C. (Eds.), *International Environmental Negotiations: Strategic Policy Issues*. Edward Elgar, Cheltenham, pp. 71-96

Carree, M.A., Klomp, L., Thurik, A.R., 2000, “Productivity convergence in OECD manufacturing industries”, *Economic Letters*, 66, 337–345

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

Castles, I., Henderson, D., 2003, “The IPCC Emission Scenarios: An Economic-Statistical Critique”, *Energy and Environment*, Vol. 14, No. 2&3, pp. 159-185

CEPII, 2006, “World Growth and International Capital Flows in the 21st Century”, *Document de travail OFCE*, n° 2006-07, avril.

Chapuis, T., 1996, *“Les problèmes de décisions et le changement global : les leçons de la modélisation en économie de l’énergie”*, Thèse de Doctorat, Sciences Économiques : Hourcade, J-C : (dir.) : Paris, EHESS, 366pp.

Chichilnisky, G., Heal, G. M., 1994, “Who should abate carbon emission? An international perspective”, *Economics Letters*, 44, 443-9

Cho, D., 1994, “Industrialization, Convergence and Patterns of Growth”, *Southern Economic Journal*, 61(2), 398-414

Clarke, J., F., Edmonds, J. A., 1993, “Modelling energy technologies in a competitive market”, *Energy Economics*, 15(2), 123-129

Claussen, E., McNeilly, L., 1998, “Equity and Global change: The complex elements of global fairness”, Pew Center on Global Climate Change, 39 p.

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

Corrado, C., Mattey, J., 1997, “Capacity Utilization”, *Journal of Economic Perspectives*, 11(1), 151-167

Copeland, B. R., Taylor, M. S., 2004, “Trade, Growth, and the Environment”, *Journal of Economic Literature*, 42(1), 7-71

Crassous, R., Hourcade, J.-C., Sassi, O., 2006, “Endogenous structural change and climate targets. Modelling experiments with Imaclim-R”, *The Energy Journal*, Special Issue n° 1, 259-276

De la Chesnaye, F., Weyant, J., (eds), 2006, “Multi-Greenhouse Gas Mitigation and Climate Policy”, *The Energy Journal*, Special Issue, 2006

Demailly, D., Quirion, P., 2005, “Leakage from climate policies and border tax adjustment: lessons from a geographic model of the cement industry”, CESifo, David Bradford memorial conference on the design of climate policy, Venice, July.

Demailly, D., 2008, “C*ompétitivité et fuites de carbone dans l'industrie sous politique climatique asymétrique”*, Thèse de doctorat, Economie de l’Environnement : Hourcade J.-C. (dir.), Paris, EHESS, 278 p.

Den Elzen M., Berk, M., Schaeffer, M., Olivier, J., Hendriks, C., Metz, B., 1999, “The Brazilian Proposal and other Options for International Burden Sharing: an evaluation of methodological and policy aspects using the FAIR Model”, *RIVM Report No. 728001011*, Bilthoven.

Denison, E.F., 1962, *The Sources of Economic Growth in the US and the Alternatives Before Us*. Committee for Economic Development, New York

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

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

Drouet, L., A. Haurie, M. Labriet, P. Thalmann, M. Vielle, and L. Viguier, 2005, "A coupled bottom-up / top-down model for GHG abatement scenarios in the housing sector of Switzerland", In *Energy and Environment, Mathematics of Decision Making*, pages 27-61. Springer, New York, 2005

Dumas, P., 2006, *"L'évaluation des dommages du changement climatique en situation d'incertitude : l'apport de la modélisation des coûts de l'adaptation"*, Thèse de Doctorat, Économie de l'environnement : Hourcade, J-C (dir.) : Paris, EHESS, 245 p

Duncan, R., Wilson, C., 2004, *Global population projections – is the UN getting wrong?*, RIRDC Publication No 04/041, Australian Government, Full report

Durlauf, S., Johnson, P., 1995, "Multiple regimes and cross-country growth behavior", *Journal of Applied Econometrics*, 10, 365-84

Edenhofer, O., Lessmann, K., Kemfert, C., Grubb M., Koehler J., 2006, "Technological Change: Exploring its Implications for the Economics of Atmospheric Stabilization", *The Energy Journal* Special Issue, "Endogenous Technological Change and the Economics of Atmospheric Stabilization", 93

Edenhofer, O., Carraro, C., Koehler, J., Grubb, M. (eds) (2006): Endogenous Technological Change and the Economics of Atmospheric Stabilisation. A Special Issue of The Energy Journal, Vol. 27, International Association of Energy Economics, USA.

Edmonds, J.A., H.M. Pitcher, D. Barns, R. Baron and M.A. Wise, 1993, "Modeling Future Greenhouse Gas Emissions: The Second Generation Model Description", in *Modeling Global Change*, Lawrence R. Klein and Fu-chen Lo, eds. United Nations University Press, New York

Edmonds, J.A., Reilly, J.M., 1983, "A long-term global energy-economic model of carbon dioxide release from fossil fuel use", *Energy Economics* 5(2): 74-88

Edmonds, J., Reilly, J., 1982, "The IEA/ORAU Long-Term Global Energy-CO_2 Model: Personal Computer Version A84PC". Institute for Energy Analysis, Oak Ridge Associated Universities, Washington, D.C.

Edmonds, J.A., 1983, "The Long-Term Global Energy-CO_2 Model: Software description", Institute for Energy Analysis, Oak Ridge Associated Universities, Washington, D.C.

Ehrlich, P., Holdren, J., 1972, "Review of The Closing Circle", *Environment*, April, 24-39

Elmslie, B.T., 1995, "Retrospectives: the *convergence* debate between David Hume and Josiah Tucker", *Journal of Economic Perspectives*, 9, 207-216

Fawcett, A., Sands R., 2005, "The Second Generation Model: Model Description and Theory", working paper PNNL-15432, http://www.epa.gov/oar/sgm_theory_final_1.pdf

Finon, D., 1974, "Optimization model for the French energy sector", *Energy Policy* 2(2): 136-151

Fishbone, L.G., Giesen, G., Goldstein, G., Hymmen, H.A., Stocks, K.J., Vos, H., Wilde, D., Zelcher, R., BaIzer, C., and Abilock, H., 1983, "User's Guide for MARKAL (BNLIKFA Version 2.0) A Multi-period Linear-programming Model for Energy Systems Analysis". Brookhaven National Laboratory, Long Island, USA, and Kernforschungsanlage Jülich, Jülich, FRG, 1983.

Forrester, J. W., 1968, *Principles of Systems*, (2ème édition). Waltham, MA: Pegasus Communications, 391 pp.

Forrester, J. W., 1961. *Industrial Dynamics*, Waltham, MA: Pegasus Communications, 464 pp.

Fougeyrollas, A., Le Mouël, P., Zagamé, P., 2005, "Les nouvelles théories de la croissance en application : L'évaluation des politiques structurelles, le cas du protocole de Kyoto", *Revue économique*, 56(5), 1089 -1105

Foxon, T. J., Gross, R., Chase, A., Howes, J., Arnall, A., Anderson, D., 2005, "UK innovation systems for new and renewable energy technologies: Drivers, barriers and systems failures", *Energy Policy*, 33(16), 2123–2137

Frisch, J.-R., Brendow, K., Saunders, R., 1989, *Horizons énergétiques mondiaux: 2000-2020*, Editions TECHNIP, 378 pp., 1989

Frondel M., Schmidt M. C., 2002, "The Capital-Energy Controversy: An Artifact of Cost Shares?", *The Energy Journal*, 23(3), 53-79

Fujino, J., Hibino, G., Ehara, T., Matsuoka, Y., Masui, Y., Kainuma, M., 2008, "Back-casting analysis for 70% emission reduction in Japan by 2050", *Climate Policy*, special supplementary issue, Volume 8(S), June 2008, 'Modelling Long-term Scenarios for Low Carbon Societies'

Fulton, L., Eads, G., 2004, "IEA/SMP Model Documentation and Reference Case Projection", http://www.wbcsd.org/web/publications/mobility/smp-model-document.pdf

Galor, O., 1996, "Convergence? Inference from theoretical models", *The Economic Journal*, 106, 1056-1069

German Advisory Council on Global Change, 2008, "World in Transition – Climate Change as a Security Risk", Report from WBGU to the German Federal Environment Minister, Earthscan, London, 248 p.

Gerschenkron, A., 1952, "Economic backwardness in historical perspective" in *The Progress of Underdeveloped Areas.* (ed. B.-F. Hoselitz). Chicago: University of Chicago Press

Ghersi, F., Hourcade, J.-C., 2006, "Macroeconomic Consistency Issues in E3 Modeling: The Continued Fable of the Elephant and the Rabbit", *The Energy Journal*, numéro spécial *Hybrid Modeling of Energy-Environment Policies: reconciling Bottom-up and Top-down* : 39-62

Ghersi, F., 2003, *Changement technique et double dividende d'écotaxes : un essai sur la confluence des prospectives énergétique et macro-économique*, Thèse de Doctorat, EHESS, Hourcade, J.-C. (dir.), Paris, 289 p.

GIEC, 2007, *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., 851 pp

GIEC, 2001, *Climate Change 2001: Mitigation, Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, Bert Metz, Ogunlade Davidson, Rob Swart and Jiahua Pan (Eds.), Cambridge University Press, UK. 700 pp

GIEC, 1995, *Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions of Climate Change, Contribution of Working Group III to the Second Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, J.P.Bruce, H.Lee, E.F.Haites (Eds), Cambridge University Press, UK, 448 pp

Gilotte, L., 2004, *Incertitude, inertie et choix optimal. Modèles de contrôle optimal appliqués au choix de politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre*, Thèse de Doctorat : SCI. ECON. (Analyse et Politique Économiques) : De Lara, M.(dir.) : Paris, ENPC (Ecole Nationale des Ponts et Chaussées), 175 p.

Gitz, V., 2004, *"Changement d'usage des terres et politiques climatiques globales"*, Thèse de Doctorat, Science de l'environnement : Hourcade J-C, (dir.) : Paris, ENGREF, 450 p.

Goldemberg, J., Johansson, T.B., Reddy, A.K.N., and Williams, R.H., 1988, *Energy for a Sustainable World*, Wiley-Eastern, New Delhi, 571 pp., January.

Golombek, R., Hoel, M., 2005, "Climate policy under technology spillovers", *Environmental and Resource Economics*, 31, 201-227

Goodwin, R. M., 1951, "The Nonlinear Accelerator and the Persistence of Business Cycles", *Econometrica*, 19, 1-17

Goulder L., Mathai, K., 2000, "Optimal CO2 abatement in the presence of induced technical change", *Journal of Environmental Economics and Management*, 39, 1-38

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

Griliches, Z., 1992, "The Search for R&D Spillovers", *Scandinavian Journal of Economics*, 94, 29-47

Groenenberg H., Phylipsen, P., Blok, K., 2000, "Differentiating commitments world wide: global differentiation of GHG reductions based on Triptych approach - a preliminary assessment", *EnergyPolicy*, 29, 1001-1030

Grübler, A., Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., Fenhann, J., Hare, B., Mori, S., Pepper, B., Pitcher, H., Riahi, K., Rogner, H.-H., La Rovere, E., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, R.P., Swart, R., Victor, N., Yong Jung, T., 2004, "Emissions Scenarios: A Final Response", *Energy and Environment*, Vol. 15, No. 1, pp. 11-24

Grübler, A., Messner, S., 1998, "Technological change and the timing of mitigation measures", *Energy Economics*, 20(5-6), 495-512

Ha Duong, M., 1998, *"Comment tenir compte de l'irréversibilité dans l'évaluation intégrée du changement climatique ?"*, Thèse de Doctorat : Économie, Hourcade J-C (dir.) : Paris, EHESS, 257 p. + annexes, 148 p.

Ha Duong, M, Grubb, M.J., Hourcade. J.-C., 1997, "Influence of socioeconomic inertia and uncertainty on optimal CO2-emission abatement". *Nature*, 390, 270-274

Häfele, W., 1981, *Energy in a Finite World*, Ballinger Publishing Company, Cambridge, MA

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), 330-340

Hallegatte, S., 2007, "Do current assessments underestimate future damages from climate change?", *World Economics*, 8, 131–146.

Hallegatte, S., 2005, *"Interactions d'échelles en économie : application à l'évaluation des dommages économiques du changement climatique et des évènements extrêmes"*, Thèse de Doctorat, Sciences Économiques : Hourcade J-C (dir.) : Paris, EHESS, 298 p.

Hanaoka, T., M. Kainuma, R. Kawase, and Y. Matsuoka, 2006, "Emissions Scenarios Database and Regional Mitigation Analysis: A Review of Mitigation Scenarios since the IPCC Third Assessment Report", *Environmental Economics and Policy Studies*, Vol.7, No.3, pp.367-389

Hansen, J., Mki. Sato, R. Ruedy, P. Kharecha, A. Lacis, R.L. Miller, L. Nazarenko, K. Lo, G.A. Schmidt, G. Russell, I. Aleinov, S. Bauer, E. Baum, B. Cairns, V. Canuto, M. Chandler, Y. Cheng, A. Cohen, A. Del Genio, G. Faluvegi, E. Fleming, A. Friend, T. Hall, C. Jackman, J. Jonas, M. Kelley, N.Y. Kiang, D. Koch, G. Labow, J. Lerner, S. Menon, T. Novakov, V. Oinas, Ja. Perlwitz, Ju. Perlwitz, D. Rind, A. Romanou, R. Schmunk, D. Shindell, P. Stone, S. Sun, D. Streets, N. Tausnev, D. Thresher, N. Unger, M. Yao, and S. Zhang, 2007, Dangerous human-made interference with climate: A GISS modelE study., *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 2287-2312.

Hansen, J., D. Johnson, A. Lacis, S. Lebedeff, P. Lee, D. Rind, and G. Russell, 1981, "Climate impact of increasing atmospheric carbon dioxide", *Science*, 213, 957-966

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

Hickman, B. G., Huntington, H. G., Sweeney, J. L., 1987, *Macroeconomic Impacts of Energy Shocks*, Amsterdam: North-Holland

Hicks, J. R., 1973, *Capital and Time: a Neo-Austrian Theory*, New York and London: Oxford University Press

Hicks, J. R., 1965, *Capital and Growth*, New York and London: Oxford University Press

Hicks, J. R., 1939, *Value and Capital*, New York and London: Oxford University Press

Hildenbrand, W., Kneip, A., 1999, "Demand aggregation under structural stability", *Journal of Mathematical Economics*, 31, 81-109

Hoffman, K.C., 1973, "A Unified Framework for Energy System Planning," in Searl, *Energy Modeling*, Resources for the Future, Inc., Washington, D.C., pp. 110-143

Hoel, M., 1996, "Should a carbon tax be differentiated across sectors", *Journal of public economics*, 59(1), 17-32

Hogan, W. W., Manne, A.S., 1977, "Energy-Economy lnteractions: The Fable of the Elephant and the Rabbit", in C. J. Hitch (Ed.), *Modelling Energy-Economy lnteractions: Five Approaches*, Resources for the Future, Washington D.C.

Holtsmark B., Alfsen K, 2004, "The use of PPP or MER in the construction of emission scenarios is more than a question of 'metrics'", *Climate Policy*, 4, 205-216

Hourcade, J.-C., 2007, "Les modèles dans les débats de politique climatique : entre le Capitole et la Roche Tarpéienne ? » in Dahan-Dalmedico, A. (dir.). *Les modèles du futur. Changement climatique et scénarios économiques : enjeux politiques et économiques*, A. Dahan-Dalmedico (dir.), 2007, Paris : La Découverte

Hourcade, J.C., 2002, "Dans le labyrinthe de verre. La négociation sur l'effet de serre", *Critique Internationale*, Fondation Nationale des Sciences Politiques, avril, 143-159

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*

Hourcade, J.-C., Shukla, P.R., Mathy, S., 2006, Untying the Climate-Development Gordian Knot – Economic Options in a Politically Constrained World, in R. Guesnerie, H. Tulkens, (eds.), *The Design of Climate Policy*, MIT Press, 19 p., in press.

Hourcade, J.C., Shukla, P.R., Mathy, S., 2005, "Untying the Climate - Development Gordian Knot : Economic options in a politically constrained world", David F. Bradford Memorial Conference on "the design of climate policy", 22-23 juillet 2005, Venice International University, San Servolo.

Hourcade, J. C., Journé, V., 2003, "Monsieur Homais, les guides de montagne et le maître nageur - Variations sur la négation des risques climatiques", *Critique Internationale*, n°18, 2003/1, 65-79

Hourcade, J.-C., Gilotte, L., 2000, "Differentiated or uniform international carbon taxes: Theoretical evidences and procedural constraints", in Chichilnisky, G. et Heal, G. (eds.) *Environmental Markets*, New York, Columbia University Press, Chap. 8

Hourcade, J. C., Robinson, J., 1996, "Mitigating Factors: Assessing the Costs of Reducing GHG Emissions", *Energy Policy*, 24 (10/11), 863-873

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

Hourcade, J.C., Kalaydjian, R., 1987, "Macroéconométrie et choix technologiques structurants : bilan et questions à partir du domaine de l'énergie". XIXe colloque Structures économiques et économétrie, organisé par l'ARAE (Association Rhodanienne pour l'avancement de l'économétrie), le LATAPSES CNRS et l'Equipe Economie et économétrie de l'environnement, Sophia-Antipolis, 21-22 mars

Hourcade, J.C., 1984, *Prospective de l'énergie et stratégies de développement dans le tiers monde*, Thèse de Doctorat d'Etat en Sciences Economiques, Université Paris VIII Vincennes à Saint-Denis, octobre

Howarth, R., 2000, "Climate Change and the Representative Agent", *Environmental & Resource Economics*, European Association of Environmental and Resource Economists, vol. 15(2), 135-148

Hubbert, M. K., 1962, *Energy Resources*, A Report to the Committee on Natural Resources, National Academy of Sciences. Government Printing Office. Publication No. 1000-D

Hubbert, M.K., 1956, "Nuclear energy and the fossil fuels", *Drilling and Production Practice.* American Petroleum Institute, 7-25

Inada, K.-I., 1963. On a two-sector model of economic growth: comments and a generalization, *Review of Economic Studies*, 30 (2), 119–127.

International Energy Agency, 2000, *Experience Curves for Energy Technology Policy*, IEA, Paris

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

Jaccard, M.K., Nyboer, J., Bailie, A., Taylor, A., Sadownik, B., Laurin, A., Murphy, R., Bataille, C; Nanduri, M., D'Abate, R. et C. Lai, 2000, *Integration of GHG Emission. Reduction Options using CIMS*. Rapport préparé pour Analysis and Modelling Group Climate Change National Implementation Process

Jacoby H.D., Schlamensee, R., Wing, I. S., 1999, "Toward a Useful Architecture for Climate Change Negotiations", *Joint*
Program on the Science and Policy of Global Change Report No.49, MIT, Cambridge

Jansen J.C., J.J. Battes. J.P.M. Sijm, C.H. Volkers, J.R. Ybema, 2001, "The multi-sector convergence approach, A flexible framework for negotiating global rules for national greenhouse gas emissions mitigation targets", *CICERO Working Paper 2001:4, Oslo*

Jiang, S., 2008, "Macroeeconomic determinants of long run emissions", stage de Master II, CIRED, 99 p.

Johansen, L., 1972, *Production functions: An integration of micro and marco, short run and long run aspects*, North-Holland, Amsterdam, 274 pp.

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

Jones, D. W., Leiby, P. N., Paik, I. K., 2004, "Oil Price Shocks and the Macroeconomy: What Has Been Learned Since 1996?", *The Energy Journal* 25(2): 1-32

Jones, D.W., Leiby, P.N., 1996, "The Macroeconomic Impacts of Oil Price Shocks: A Review of Literature and Issues", Oak Ridge, Ten.: Oak Ridge National Laboratory

Jorgenson, D.W., Wilcoxen, P.J., 1990, "The Cost of Controlling U.S. Carbon Dioxide Emissions", in Proceedings of the Workshop on Economic/Energy/Environmental Modeling for Climate Policy Analysis, D.O. Wood and Y. Kaya. Center for Energy Policy Research and Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, and Department of Electrical Engineering, University of Tokyo Global Environmental Study Laboratory, Tokyo

Jorgenson, D.W., Houthakker, H.S., 1973, *US energy resources and economic growth* (Series). Washington DC, Energy Policy Project

Kaldor, N., 1940 "A Model of the Trade Cycle", *Economic Journal*, 50, 78-92

Kalecki, M., 1939, *Essays in the Theory of Economic Fluctuation*, 1972 edition, London: Allen and Unwin

Kantor, B., 1979, “Rational Expectations and Economic Thought”, *Journal of Economic Literature*, 17(4), 1422-1441

Keeling, C.D., Bacastow, R.B., 1977, “Impact of industrial gases on climate”, in *Energy & Climate. Studies in Geophysics*, National Academy of Sciences, Washington, D.C., 72-95

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, 691-723

Keynes, J. M., 1936, *The General Theory of Employment, Interest and Money*, Macmillan Cambridge University Press.

Kim, S.H., J. Edmonds, J. Lurz, S. J. Smith, M. Wise, 2006, “The ObjECTS Framework for Integrated Assessment: Hybrid Modeling of Transportation ”, *The Energy Journal*, Hybrid Modeling, Special Issue #2, 2006

Kirman, A., P., 1992, “Whom or what does the representative individual represent?”, *Journal of Economic Perspectives*, 6, 117-136

Koopmans, T., 2001, *Activity Analysis of Production and Allocation*, Volume 13 of Cowles Commission Monograph, pages 33--97. John Wiley & Sons, New York, 1951

Koopmans, T.C., 1975, “Concepts of optimality and their uses”, Nobel Prize Lecture, December, 11, 1975

Koopmans, T. C., 1965, “On the concept of optimal economic growth”, in *Econometric Approach to Development Planning*, chap. 4, 225–87. North-Holland Publishing Co., Amsterdam.

Koopmans, T., 1951, *Activity Analysis of Production and Allocation*, volume 13 of Cowles Commission Monograph, pages 33--97. John Wiley & Sons, New York

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*, 14(1-4), 222-248

Krugman, P., 1987, “The Narrow Moving Band, the Dutch Disease, and the Competitive Consequences of Mrs. Thatcher”, *Journal of Development Economics*, 27(1-2), 41-55

Labriet, M., Loulou, R., Kanudia, A., Vaillancourt, K., 2004, “The advanced world MARKAL Model: Description of the inputs”, *Les Cahiers du GERAD*

Laffont, J. J., 1977, *Effets externes et théorie économique*, Paris: Editions du CNRS

Laherrère, J.H., 2003, “Future of oil supplies”, *Energy Exploration & Exploitation*, 21(3), 227-267

Laherrère, J.H., 2001, “Forecasting future production from past discovery”, *International Journal of Global Energy Issues*, 18(2-4), 218-238

Lecocq, F., Crassous, R., 2003, “International Climate Regime beyond 2012: Are Quota Allocation Rules Robust to Uncertainty?”, *Policy Research Working Paper* 3000, World Bank, Washington D.C.

Lecocq, F., Hourcade, J.-C., 2003 “Equitable provision of long-term public goods: the role of negotiation mandates”, *Policy Research Working Paper Series* 3180, The World Bank, Washington D.C.

Lecocq, F., 2000, *“Distribution spatiale et temporelle des coûts de politiques publiques sous incertitudes. Théorie et pratique dans le cas l’effet de serre”*. Thèse de Doctorat : Sciences de l’Environnement : Hourcade, J-C (dir.) : Paris, ENGREF.

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), 539-555

Leontief, W., 1974, *Essais économiques*, Paris, Calmann-Levy

LEPII, 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)

Lévy-Garboua, V. , Denizot, F.-B., 1972, "Le problème de l'agrégation : un essai de synthèse", *Revue économique*, 23(1), 20-53

Lomborg, B., 2001, *The Skeptical Environmentalist: Measuring the Real State of the World*, Cambridge University Press, 2001

Löschel, A., 2002, "Technological Change in Economic Models of Environmental Policy: a Survey", *Ecological Economics*, 43, 105-126

Lovins, A.B., LH. Lovins, F. Krause, W. Bach, 1981, *Energy Strategies for Low Climate Risk*. Report for the German Federal Environmental Agency, International Proiect for Soft-Energy Paths, San Francisco, CA, USA

Lovins, A.B., 1977, *Soft Energy Paths: Toward a Durable Peace*, Penguin Books

Lucas, R., J., 1988, "On the mechanics of economic development", *Journal of Monetary Economics*, Elsevier, 22(1), 3-42

Lucas, R. Jr., 1973, "Some International Evidence on Output-Inflation Tradeoffs", *American Economic Review*, 63(3), 326-34

Lucas, R. Jr., 1972, "Expectations and the Neutrality of Money", Journal of Economic Theory, 4(2), 102-24

MacCracken, C. N., Edmonds, J. A., Kim, S. H., Sands, R. D., 2000, "The Economics of the Kyoto Protocol", *Energy Journal*, Vol. 21, suppl., pp. 25-72

MacDonald, G.F., H.Abarbanel, P.Carruthers, J.Chamberlain, H.Foley, W.Munk, W. Nierenberg, O.Rothaus, M.Ruderman, J.Vesecky, F.Zachariasen, 1979, "The long term impact of atmospheric carbon dioxide on climate", JASON Technical Report JSR-78-07, SRI International, Arlington, Virginia

Maddison, A., 2001, *The World Economy: A Millennial Perspective*. Paris: OECD, 2001, 384 pp.

Malinvaud, E., 2002, "Les problèmes d'agrégation en macroéconomie", Colloque international du vingtième anniversaire du GREQAM, Vieille charité, Marseille, 29 juin 2002

Malinvaud, E., 1993a, "Regard d'un ancien sur les nouvelles théories de la croissance", *Revue Economique*, n° 2, mars 1993, 171-188

Malinvaud, E., 1993b, "A Framework for Aggregation Theories", *Ricerche Economiche, 47:2,*107-135

Malinvaud, E., 1977, *The theory of unemployment reconsidered*, Basil Blackwell.

Manne, A.S., Rutherford, T.F., 1994, "International trade, Capital Flows and Sectoral Analysis: formulation and solution of intertemporal equilibrium models", in W.W. Cooper and A.B. Whinston, eds., *New Directions in Computational Economics*, Springer, 1994, 191-205

Manne, A.S. , Richels, R.G., 1990, "CO2 emission reductions: an economic cost analysis for the USA", *The Energy Journal*, 11(2):51-75

Manne A.S., Richels, R.G., 1977, "ETA-MACRO: A Model of Energy-Economy Interactions", in C. J. Hitch (ed.), *Modeling - Energy-Economy Interaction*, Resources for the Future, Washington, D.C., 1977

Manne, A. S., Markowitz, H. M., 1961, "Studies in process analysis: economy-wide production capabilities", Proceedings of a Conference Sponsored by The Cowles Foundation for research in economics at Yale university, April 24–26, 427 pp

McKibbin, W. J. , Pearce, D., Stegman, A., 2007, “Long term projections of carbon emissions”, *International Journal of Forecasting*, Elsevier, vol. 23(4), pages 637-653

McKibbin, W. J., Wilcoxen, P. J., 1998, "The theoretical and empirical structure of the G-Cubed model”, *Economic Modelling*, Elsevier, vol. 16(1), pages 123-148, January

Meadows, D., Meadows, D., 1972, *The Limits to Growth : A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*, New York, USA, Universe Books

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

MIES, 2004, “La division par 4 des émissions de dioxyde de carbone en France d’ici 2050, Introduction au débat”, Rapport rédigé par Pierre Radanne pour la Mission interministérielle de l’effet de serre, 40 p.

Miketa, A., 2004, “The Use of Purchasing Power Parities in Long-Term EconomicGrowth Scenarios”, presentation at IIASA, International Institute for Applied System Analysis (IIASA), Laxenburg

Miketa, A., 2001, “Analysis of Energy Intensity Developments in Manufacturing Sectors in Industrialized and Developing Countries”, *Energy Policy*, 29, 769-775

Mintzer, I., 1987, “A Matter of Degrees: The Potential for Controlling the Greenhouse Effect”, Research Report #5, World Resources Institute, Washington, D.C.

Mork, K. A., “Business Cycles and the Oil Market”, *The Energy Journal*, Special Issue, 15, 15-38

Mouchot, C., 2003, *Méthodologie économique*, Seuil, coll. Points Economie, 558 p.

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

Muth, J. F., 1961, “Rational Expectations and the Theory of Price Movements”, *Econometrica*, 29, 315-335

Nakicenovic N., P. Kolp, K. Riahi, M. Kainuma, T. Hanaoka, 2006, “Assessment of Emissions Scenarios Revisited”, *Environmental Economics and Policy Studies*, 7(3):137-173

Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A. et al., 2000, *Special Report on Emissions Scenarios*, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press, Cambridge

Negishi, T., 1960, “Welfare economics and existence of an equilibrium for a competitive economy”, *Metroeconomica*, 12, 92-97

Nordhaus, W., 2007, “Alternative measures of output in global economic-environmental models: Purchasing power parity or market exchange rates?”, *Energy Economics*, 29(3), 349-372

Nordhaus, W. D., Boyer, J., 2000, Warming the World : Economics Models of Global Warming. MIT press.

Nordhaus, W., 1999, “Modeling induced innovation in climate change policy”, Paper for the workshop *Induced Technological Change and the Environment*, June 21-22, 1999, IIASA, Laxenburg

Nordhaus, W., 1993, “Optimal Greenhouse-Gas Reductions and Tax Policy in the ‘DICE’ Model”, *American Economic Review*, May 1993, vol. 83, pp. 313-317

Nordhaus, 1992, “An Optimal Transition Path for Controlling Greenhouse Gases”, *Science*, vol. 258, November 20, 1992, pp. 1315-1319

Nordhaus, W., Ausubel, J., 1983, “A Review of Estimates of Future Carbon Dioxide Emissions,” National Research Council-National Academy of Sciences, Changing Climate, National Academy Press, 1983

Nordhaus, W., Yohe, G., 1983, “Future Carbon Dioxide Emissions from Fossil Fuels”, in National Research Council-National Academy of Sciences, *Changing Climate*, National Academy Press, 1983

Nordhaus, W., 1980, “Thinking about carbon dioxide: theoretical and empirical aspects of optimal control strategies”, Cowles Fundation Discussion Paper No 565, Yale University, October 1980

Nordhaus, W., 1979, *The Efficient Use of Energy Resources*, Yale University Press, 1979

Nordhaus, W., 1977a, “Economic Growth and Climate: The Carbon Dioxide Problem”, *American Economic Review*, (February 1977), 67(1): 341-346 [Cowles Foundation Discussion Paper 435, 18pp]

Nordhaus, W., 1977b, “The Demand for Energy: An International Perspective,” in William Nordhaus, ed., Chapter 13, *International Studies of the Demand for Energy*, North-Holland Publishing Company, 1977

Nordhaus, W. D., 1973, “World Dynamics: Measurement Without Data”, *The Economic Journal*, 83 (332), 1145-1183

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

Oliveira Martins, J., Sturm, P., 1998, “Efficiency and Distribution in Computable Models of Carbon Emission Abatement”, OECD Economics Department Working Papers 192, OECD Economics Department

Pacala, S., Socolow, R., 2004, "Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the next 50 Years with Current Technologies", *Science*, 305(5686), 968 - 972

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

Perroni, C., Rutherford, T., 1991, “lnternational trade in carbon emissions rights and basic materials : general equilibrium calculations for 2020”, OECD mimeo

Philibert, C., Pershing, J., 2002, “*Beyond Kyoto, Energy Dynamics and Climate Stabilisation*”, Organisation for Economic Co-operation and Development and International Energy Agency, Paris, 164 pp.

Philibert, C., Pershing, J., 2001, “Considering the options: Climate targets for all countries”, *Climate Policy*, 1(2)

Pielke, R. J., Wigley, T., Green, C., 2008, “Dangerous Assumptions”, *Nature*, **452**, 531-532

Pizer, W. A., 1997, “Prices vs Quantities Revisited: the Case of Climate Change”, RFF Discussion Paper 98-02, Resources for the Future, Washington D.C.

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, 163-174

Popp, D., 2002, “Induced innovation and energy prices”, *American Economic Review* 92 (1), 160-180

Prins, G., Rayner, S., 2007, “Time to ditch Kyoto”, *Nature* 449, 973-975 (25 October 2007)

Quah, D., 1996, “Empirics for economic growth and convergence”, *European Economic Review*, 40(6), 1353-1375

Quah, D. T., 1993, “Galton.s Fallacy and the Convergence Hypothesis”, *Scandinavian Journal of Economics*, 95, 427-443

Ramsey, F., 1928, “A Mathematical Theory of Saving”, *Economic Journal*, 38(152), 543–559

Rana A., Morita, T., 2000, "Scenarios for Greenhouse Gas Emissions: A Review of Modeling of Strategies and Policies in Integrated Assessment Models", *Environmental Economics and Policy Studies*, 3, 2, 267-289

Raupach M.R., Marland, G., Ciais, P., Le Quéré, C., Canadell, J.G., Klepper, G. Field, C. B., 2007, "Global and regional drivers of accelerating CO_2 emissions", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, May 22, 2007.

Rehrl, T., Friedrich, R., 2006, "Modelling long-term oil price and extraction with a Hubbert approach: The LOPEX model", *Energy Policy*, 34(15), 2413-2428

Reilly, J., Edmonds, J., Gardner, R., Brenkert, A., 1987, "Uncertainty analysis of the IEA/ORAU CO2 emissions model", *The Energy Journal*, Vol. 8 No.3, pp.1-29

Reiner, D. M., Jacoby H.D, 1997, "Annex I differentiation proposals: implications for welfare, equity and policy", *Joint Program on the Science and Policy of Global Change Report No.27*, MIT, Cambridge

Ringius, L., Torvanger, A., Underdal, A., 2000, "Burden differentiation: fairness principles and proposals", Working Paper, 13, Center for International Climate and Environmental Research, Oslo

Ringius L., Torvanger, A., Holtsmark, B., 1998, "Can multi-criteria rules fairly distribute climate burdens - OECD results from three burden sharing rules", *Energy Policy* 26(10), 777-793

Roberts, M., Spence, M., 1976, "Effluent charges and licenses under uncertainty", *Journal of Public Economics*, 5, 193-208

Robinson, J., 1956, *The Accumulation of Capital*, Londres: Macmillan

Robinson, J., 1954, "The Production Function and the Theory of Capital", *Review of Economic Studies*, 21(2), 81-106

Rogner, H., 1997, "An assessment of world hydrocarbon resources", *Annual Review of Energy and the Environment*, 22, 217-262

Romer, P.M., 1990; "Endogenous Technological Change", *Journal of Political Economy*, University of Chicago Press, 98(5), 71-102

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

Sala-i-Martin, X., 1996, "Regional cohesion: Evidence and theories of regional growth and convergence", *European Economic Review*, 40(6), 1325-1352

Sala-i-Martin, X., 1990, *On growth and states*, Ph.D. Dissertation, Harvard University.

Samuelson, P. A., 1966, "A Summing Up", *Quarterly Journal of Economics*, 80(4), 568-583

Samuelson, P. A., 1962, "Parable and Realism in Capital Theory: The Surrogate Production Function", *Review of Economic Studies*, 29(3)

Sands, R.D., Miller, S., Kim, M.-K., 2005, "The Second Generation Model: Comparison of SGM and GTAP Approaches to Data Development", PNNL report no. 15467 prepared for the United States Environmental Protection Agency

Sargent, T. J., Wallace, N., 1975, "'Rational' Expectations, the Optimal Monetary Instrument and the Optimal Money Supply Rule", *Journal of Political Economy*, 83(2), 241-255

Sassi, O., 2008, "*L'impact du changement technique endogène sur les politiques climatiques*", Thèse de Doctorat : Sciences Economiques : Hourcade J-C (dir.), Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 278 pp.

Schäfer A., Jacoby H.D., 2005, "Technology Detail in a Multi-Sector CGE Model: Transport under Climate Policy", *Energy Economics*, 27(1): 1-24

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

Sen, A. K., 1992, *Inequality Reexamined*, Harvard University Press

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

Siegenthaler, U., Oeschger, H., 1978, "Predicting Future Carbon Dioxide Levels", *Science*, vol. 199, pp. 188-195

Söderholm, P., Sundqvist, T., 2003, "Learning Curve Analysis for Energy Technologies: Theoretical and Econometric Issues", paper presented at the International Energy Workshop (IEW), Laxenburg, Austria, June 24-26.

Solow, R., 2000, "Toward a Macroeconomics of the Medium Run", *The Journal of Economic Perspectives*, 14(1), 151-158

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

Solow, R., 1970, *Growth Theory: An Exposition*, Clarendon Press, Oxford, U.K.

Solow, R., 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., 1957, "Technical Change and the Aggregate Production Function.", *Review of Economics and Statistics*, 39, 312-320

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

Stavins, R., 1997, "Policy Instruments for Climate Change: How Can National Governments Address a Global Problem?", Discussion Papers dp-97-11, Resources For the Future

Sterman, J. D., 1991, "A Skeptic's Guide to Computer Models", in Richardson, G. P. (Ed.) *Modelling for Management*, Aldershot, UK, Dartmouth Publishing Company

Stern, N. H., 2006, "*The Economics of Climate Change: The Stern Review*", Great Britain Treasury, Cambridge University Press, 2007, 692 pp.

Stiglitz, J., 1990, "Some Retrospective Views on Growth Theory presented on the occasion of the Celebration of Robert Solow's 65th Birthday", in *Growth/Productivity/Unemployment*, P. Diamond (ed.), Cambridge, Mass.: MIT Press, 1990a, 50–68

Storchmann, K., 2005, "Long-run gasoline demand for passenger cars: the role of income distribution", *Energy Economics*, 27**,** 25–58

Szklo, A., Machado, G., Schaeffer, R., 2007, "Future oil production in Brazil – estimates based on a Hubbert model", *Energy Policy*, 35, 2360-2367

Tobin, J., 1980, "Stabilization Policy Ten Years After", *Brookings Papers on Economic Activity*, 1, 19-71.

Tol, R., 2006, "Exchange Rates and Climate Change: An Application of *Fund*", *Climatic Change*, 75(1-2), 59-80

UNFCCC, UN Framework Convention on Climate Change, Palais des Nations, Geneva, http://www.unfccc.de/index.html, 1992.

Uzawa, H. 1961. "On a Two-Sector Model of Economic Growth." *Review of Economic Studies*, 29, 40-47

Van Vuuren, D. P., Den Elzen, M. G., Berk, M. M., Lucas, P. L., Eickhout, B., Eerens, H. Oostenrijk, R., 2003, “Regional costs and benefits of alternative post-Kyoto climate regimes”, National Institute for Public Health and the Environment, Bilthoven, The Netherlands

Victor, D. 2001, *“The Collapse of the Kyoto Protocol and the Struggle to Slow Global Warming*”. Council on Foreign Relations. Princeton, NJ: Princeton University Press.

Weitzman, M., 1974, “Prices vs Quantities”, Review of Economic Studies, 41(4), 477-491

Weyant, J.P., Hill, J.N., 1999, “Introduction and Overview”, *The Energy Journal*, SpecialIssue: The Costs of the Kyoto Protocol: A Multi-Model Evaluation, pp. vii-xliv

Whalley, J., Wigle, R., 1991, "Cutting CO2 Emissions: The Effects of Alternative Policy Approaches", *The Energy Journal*, 12(1) 1991, pp. 109-24

Wicksell, K., 1911, *Lectures on Political Economy, Volume 1*. London: Routledge & Sons

Zahavi Y., Talvitie A., 1980, “Regularities in Travel Time and Money Expenditures”, *Transportation Research*, 750, 13-19