



École des Ponts
ParisTech

UNIVERSITÉ —
— PARIS-EST

Thèse

présentée pour obtenir le grade de docteur
de l'École Nationale des Ponts et Chaussées

Spécialité : Economie

Céline Guivarch

**Evaluer le coût des politiques climatiques
*de l'importance des mécanismes de second rang***

soutenue le 22 octobre 2010 devant le jury composé de

Pierre-Noël Giraud
Mark Jaccard
Franck Lecocq
Lawrence Goulder
Jean-Charles HOURCADE

Président
Rapporteurs

Examineur
Directeur de thèse

Introduction

Il y a maintenant consensus scientifique² sur le fait que des réductions ambitieuses des émissions de gaz à effet de serre sont nécessaires pour limiter les risques associés au changement climatique anthropique. Ce consensus est endossé par un nombre croissant de décideurs à travers le monde (G8 declaration in l'Aquila in July 2009 , China and Japan Statements at the United Nations Climate Summit, 2009, cible des 2 ° C : (EU 1996, 2005), Accord de Copenhague). Mais les événements récents, parmi lesquels le bien faible résultat des deux semaines de discussions intenses à Copenhague, ont démontré que les décideurs peinent à traduire une cible de long terme de réduction des émissions en une architecture de politiques concrètes et opérationnelles sur le court-terme. Un des arguments récurrents pour expliquer le refus de cibles contraignantes sur le court-terme est que les politiques climatiques seraient néfastes à la croissance³. Ainsi, c'est une impression très répandue que les coûts des politiques climatiques pourraient être si élevés qu'ils mettraient en périls nos niveaux de vie au Nord et empêcheraient les pays du Sud de se développer. Par exemple le conseiller du président Bush sur les questions économiques, Lindsey (2002), a affirmé que « *the Kyoto protocol could damage our collective prosperity and, in so doing, actually put our longterm environmental health at risk* ».

Pourtant, les évaluations économiques des coûts des politiques climatiques donnent des messages rassurants : le coût macroéconomique global de l'atténuation est estimé à moins de cinq pourcents du PIB mondial en 2050, pour les cibles de réduction des émissions les plus ambitieuses (GIEC, 2007). Cela place ces évaluations économiques au cœur de deux

²Au moment où l'on écrit ces lignes, ce consensus scientifique peut sembler ébranlé par la controverse lancée par M. Allègre dans son livre *l'Imposture climatique*. Cette thèse n'est pas le lieu de discuter cette affaire qui relève du traitement médiatique des questions scientifiques. Pour un traitement détaillé de cette controverse, le lecteur intéressé pourra se reporter au blog du journaliste S. Huet : <http://sciences.blogs.liberation.fr/home/terre/>. Notons simplement ici que, si le dossier du changement climatique est encore empreint de nombreuses d'incertitudes, on peut se demander en revanche s'il est sage de n'accorder aucun crédit aux avertissements donnés par les scientifiques du climat.

³Nordhaus, 1990 : *Depending on fossil fuels is like relying on nuclear weapons. Mankind will probably muddle along and cope with its diverse problems, but there is a chance that greenhouse warming will trigger some cataclysmic climatic event. A vague premonition of some potential future disaster is, however, insufficient grounds to plunge the world into depression, particularly when it faces present challenges and perils aplenty. But if scientists can identify the probability of catastrophic risks, people and governments can then rationally decide how much « climate insurance » to buy.*

paradoxes imbriqués : (i) les sciences du climat donnent le message inquiétant que des cibles de réduction des émissions extrêmement ambitieuses sont nécessaires, tandis que les évaluations économiques répondent par un message rassurant montrant que même des cibles très ambitieuses peuvent être atteintes à un coût économique modéré ; (ii) Bien que les évaluations économiques des politiques climatiques soient rassurantes, les décideurs tardent à adopter des mesures ambitieuses en s'appuyant souvent sur l'argument que les politiques climatiques seraient trop coûteuses.

Reprenons les trois éléments de ce double paradoxe.

Les spécificités physiques de la question du changement climatique anthropique en font un défi pour les politiques publiques et internationales. En effet, il s'agit d'une pollution de stock qui implique des horizons temporels centenaires, et, le mélange rapide des gaz à effet de serre dans l'atmosphère en fait un problème à l'échelle mondiale où la tentation du passager clandestin⁴ est forte. Par ailleurs, la décision politique doit prendre en compte deux niveaux d'incertitudes, celui de la sensibilité du climat au forçage radiatif et celui des dommages climatiques pour un climat donné, ainsi que l'existence d'effets de seuils et d'irréversibilité. Le problème est encore complexifié par la grande hétérogénéité des pays, tant face aux coûts de l'atténuation qu'en terme de vulnérabilité au changement climatique. Par ailleurs, les sources d'émissions de gaz à effet de serre sont profondément enracinées au cœur de nos sociétés, se trouvant souvent à la base même de l'activité économique et des modes de vie (transports, confort des logements, habitudes de consommation).

L'article 2 de la Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique se pose comme objectif ultime de « stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique ». Définir ce qui est un changement climatique « dangereux » est particulièrement délicat dans la mesure où cela implique un jugement de valeur sur les coûts et bénéfices mesurés dans une grande diversité de mesures : pertes monétarisables, pertes de biodiversité, pertes de vies humaines, pertes de sites du patrimoine culturel, changement de la distribution du bien-être entre les périodes temporelles ou entre différents groupes de personnes, *etc.* Prenons à titre d'exemple la cible actuellement avancée par nombre de décideurs, à savoir une cible de réchauffement de 2 °C par rapport aux températures pré-industrielles. D'après le Groupement Intergouvernemental d'Experts sur le Climat (GIEC, 2007), atteindre cette cible avec une probabilité supérieure à 50%, nécessite une stabilisation à une concentration de l'atmosphère en GES inférieure à 450 ppm CO₂équivalent⁵. Toujours d'après le GIEC, atteindre une stabilisation à 450ppm CO₂eq sans « dépassement » veut dire un pic des émissions dans la prochaine décennie suivi par une décroissance de plus de 5% par an, pour atteindre 70% de réduction en 2050 par

⁴Les réduction d'émissions de gaz à effet de serre coûtent aux pays qui s'y engagent tandis que tous en partagent les bénéfices.

⁵Notons que la concentration actuelle est de 430ppm CO₂eq, contre 280 avant la Révolution Industrielle. Mais les aérosols, dont la durée de vie est relativement courte, ont un effet de masque sur le forçage radiatif. Les émissions mondiales en 2000 étaient de 42 GtCO₂eq, ce qui engendre une augmentation de la concentration de l'ordre de 2,7 ppm CO₂eq/an.

rapport à 1990. Autoriser un « dépassement » à 500ppm avant de stabiliser à 450ppm permet de baisser le taux annuel de réduction des émissions à environ 3%, en gardant le pic en 2010, mais les trajectoires avec « dépassement » sont plus risquées en terme de dommages climatiques car elles peuvent induire le passage de seuils d'irréversibilité. En guise de comparaison, donnons quelques taux de réduction des émissions historiques : le programme nucléaire français a induit une réduction de 6% par an des émissions dues au secteur électrique entre 1977 et 2003 ; l'augmentation du prix du charbon au Royaume-Uni des les années quatre-vingt dix a conduit à une substitution vers le gaz et à 1% par an de réduction des émissions de 1990 à 2000. Ces quelques chiffres donnent l'ampleur du double défi posé par la question de l'atténuation : une transition rapide et des taux de réduction des émissions inédits à l'échelle globale.

Pour tenter d'informer les décisions face à ce défi, d'importants efforts de modélisation ont été déployés et ont conduit à une littérature foisonnante explorant les coûts des politiques climatiques. Ainsi, depuis les premiers essais de modélisation des politiques climatiques à la fin des années soixante-dix, des efforts considérables d'amélioration des modèles ont été mis en œuvre conduisant à une publication exponentielle de résultats et à une sophistication des controverses associées. Ces développements constituent une évolution à double tranchant : certes, ils traduisent 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. Les messages qui se dégagent de ces analyses économiques sont à la fois **rassurants** et **déconcertants**. Ils sont rassurants car les évaluations des coûts de la stabilisation restent inférieures à quelques pourcents du PIB en 2030 ou 2050. Mais ils sont déconcertant car les estimations s'étalent dans un intervalle allant de gains effectifs de PIB à des pertes de 5,5% de PIB en 2050 par exemple, ce qui peut laisser perplexes les décideurs et amoindrir les soutiens pour l'action.

« In 2030 macro-economic costs for multi-gas mitigation, consistent with emissions trajectories towards stabilization between 445 and 710 ppm CO₂-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 CO₂-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) » (*GIEC, 2007, résumé à l'intention des décideurs, pp. 11 et 18*).

Remarquons que cette dernière phrase est extrêmement vague et ambiguë : elle ne dit pas clairement s'il y a correspondance deux à deux entre chacune des cibles et chacun des coûts, ou s'il s'agit d'une correspondance entre les deux intervalles, qui sont si larges que la phrase est alors vidée de son sens. Il est cependant important de rappeler ici les règles

du GIEC, qui demandent que le texte des résumés pour les décideurs soit approuvé ligne par ligne par l'assemblée générale (représentants des Etats). Cette procédure explique largement la formulation prudente et vague.

Alors que la question du changement climatique est sur le devant de la scène politique et médiatique, force est de constater que les contributions de ces efforts de modélisation importants peinent à éclairer les débats. Hourcade (2007) suggère en effet que, convoqués pour éclairer les futurs, les modélisateurs se retrouvent un peu comme les invités au Capitole, bien trop proches de la roche Tarpéienne qui est alors celle du dédain de leurs travaux. Les messages rassurants des analyses économiques⁶ contrastent, en tout cas, avec les blocages persistants dans les négociations internationales et les réticences des décideurs à adopter des politiques climatiques ambitieuses.

Face à ces deux paradoxes imbriqués, un premier réflexe qui se rencontre chez les économistes professionnels est de considérer que cet écart entre les messages de l'analyse économique et la réalité des politiques est simplement dû aux aléas du jeu politique voire à l'ignorance, volontaire ou non, de l'information économique sérieuse. C'est une insatisfaction face ce réflexe qui a motivé ce travail de thèse. Son fil conducteur est un questionnement de la capacité de l'État de l'art de l'analyse économique à aider les décideurs à gérer une transition rapide vers des styles de développement différent de ceux d'aujourd'hui, et dont on pressent qu'elle ne peut en aucun cas être chose aisée. L'enjeu n'est d'ailleurs pas de savoir si les chiffres que nous venons de citer sont ou non trop optimistes ; mais de savoir si on est capable de détecter les conditions selon lesquelles cette transition serait si coûteuse socialement et économiquement qu'elle ne sera jamais entreprise, et d'en déduire les conditions selon lesquelles, au contraire, elle sera non seulement socialement acceptable mais, finalement, désirée.

Nous consacrons le premier chapitre de cette thèse à une revue de la littérature sur les coûts de l'atténuation du changement climatique. Nous discuterons les concepts utilisés parce qu'une des sources des confusions et des incompréhensions persistantes entre modélisateurs et utilisateurs des résultats de modélisation, mais aussi entre différentes communautés de modélisation, réside dans un manque de clarté, voire une méconnaissance, des notions de coût sur lesquelles reposent les résultats. Nous nous attarderons sur les définitions de ce que sont une **démarche prospective**, une **approche coût-efficacité**, puis sur les **trois concepts de coûts** fréquemment utilisés (coût technique, coût macroéconomique et coût en bien-être).

Cela nous permettra de mettre en lumière la **fragilité** de la notion de scénario de référence, ainsi que les **liens trompeurs** qui lient les trois concepts de coûts. Nous analyserons dans un second temps les résultats disponibles, en nous attachant à

⁶Notons toutefois que toutes les analyses économiques des coûts de l'atténuation ne se veulent pas rassurantes. Ainsi, le contraste est frappant entre le ton et le plaidoyer pour une action ambitieuse et précoce de la *Stern Review* (Stern, 2006) : « les bénéfices d'une action précoce et forte dépassent largement les coûts économiques de l'inaction ». et Nordhaus (2007), qui conclue que « les recommandations de Gore et Stern [...] sont plus coûteuses que de ne rien faire » (p.177).

dégager les points de consensus dans la littérature mais aussi à comprendre les raisons de la grande dispersion des estimations des coûts de l'atténuation. Nous montrerons que les différences entre modèles et les incertitudes sur les paramètres au sein d'un modèle donné conduisent à de grands intervalles pour les coûts estimés. Mais, ceci n'empêche pas que trois messages forts se dégagent : (i) les coûts de l'atténuation sont **faibles** ; (ii) les coûts sont réduits lorsque la mise en œuvre des politiques climatiques garantit une **flexibilité** des efforts de réduction des émissions entre pays, entre périodes temporelles et entre gaz (*where, when and what flexibility*) ; (iii) la prise en compte du **changement technique induit** dans les structures des modèles conduit à des estimations de coût réduites.

Cette analyse débouche, dans une troisième partie, sur les insatisfactions qui ont présidé à ce travail de thèse. En miroir des trois messages forts mis en évidence dans la partie précédente, nous montrerons qu'il subsiste un décalage entre les préoccupations des décideurs et les résultats de modélisation et qu'une certaine méfiance face à l'optimisme apparent des résultats des modèles est de mise. En particulier nous verrons que la question de la **temporalité** des coûts est négligée par la littérature alors qu'elle semble cruciale dans le processus de décision politique. D'autre part, les recommandations découlant des exercices de modélisation sur les « trois flexibilités » trouvent difficilement une traduction pragmatique pour les décideurs en termes d'instruments et de politiques à mettre en place.

Les insatisfactions sur lesquelles se conclut le premier chapitre, nous conduiront à explorer les choix méthodologiques et théoriques sous-jacents aux modèles existants. Nous verrons que ces outils sont caractérisés par deux biais méthodologiques. Tout d'abord, les modélisateurs ont fait l'hypothèse que le changement climatique est essentiellement une question de long-terme et mérite donc d'être analysé à l'échelle de plusieurs décennies ou du siècle. Dès lors, les questions de court-terme et de transition à une échelle inférieure à une ou deux décennies ont été négligées dans l'analyse des politiques climatiques. Les modèles développés pour l'analyse économique du changement climatique reposent donc pour la plupart sur des images de long-terme stabilisées. Ce premier biais en induit un second, suivant l'attitude habituelle des économistes à être « néoclassiques sur le long-terme⁷ ». Transposé dans le champs du changement climatique, cette attitude conduit à mobiliser des outils fondés sur des concepts d'**équilibre** et d'**optimalité**, avec, en particulier, une allocation optimale des ressources et une utilisation complète des facteurs de production, sur un chemin de croissance stabilisée. Ces deux biais méthodologiques peuvent conduire à l'apparition de deux situations opposées. D'un côté, les coûts des politiques peuvent être **sous-estimés**, puisque dans un monde où les agents forment des anticipations imparfaites et déploient leurs décisions au sein de systèmes techniques et sociaux caractérisés par une inertie importante, le même changement de trajectoire peut entraîner des coûts économiques bien supérieurs à ceux enregistrés dans un cadre où les anticipations

⁷Solow (2000) : « I can easily imagine that there is a « true » macrodynamics, valid at every time scale. But it is fearfully complicated, and nobody has a very good grip on it. At short time scales, I think, something sort of « Keynesian » is a good approximation, and surely better than anything straight « neoclassical ». At very long time scales, the interesting questions are best studied in a neoclassical framework, and attention to the Keynesian side of things would be a minor distraction. ».

sont parfaites. Mais de l'autre, les coûts de la stabilisation peuvent être **surestimés** en prenant comme référence un scénario économique de « premier rang », dans lequel sont ignorées les sous-optimalités du monde réel. En effet, en choisissant pour base de référence des scénarios optimaux, on s'interdit de discuter des multiples co-bénéfices des politiques climatiques qui, en fournissant un signal de long terme clair, peuvent conduire à éviter ou amortir certaines frictions transitoires survenant dans le scénario de référence. L'évitement de ces frictions se doit d'être compté positivement dans l'évaluation du coût de ces politiques.

Notre diagnostic est que de tels biais méthodologiques empêchent une évaluation correcte des **points de blocage** et des **opportunités** dans la **transition** vers des économies sobres en carbone, et risquent d'être contreproductifs pour la recherche de politiques efficaces et robustes. La construction de l'architecture de modélisation Imaclim-R constitue une tentative de sortir de ces biais.

La seconde partie du chapitre décrit cette architecture en mettant en évidence les innovations majeures : (i) la prise en compte des **contraintes de court-terme**, en particulier à travers une représentation *putty-clay* du capital ; (ii) la prise en compte d'éléments « **second-best** » : choix d'investissements sous anticipations imparfaites, rigidités des marchés du travail, utilisation incomplète du capital productif. Le chapitre se termine sur les résultats du modèle Imaclim-R, déjà publiés dans deux thèses précédant celle-ci (Crassous, 2008 et Sassi, 2008). Nous verrons que ces résultats sont **atypiques** par rapport aux résultats rapportés dans la littérature. En effet, les coûts estimés par Imaclim-R sont à la limite supérieure des évaluations existantes, voire au-delà pour ce qui est des coûts de court-terme. De plus, ils montrent un profil temporel des coûts inhabituel, présentant des coûts de court-terme très élevés, particulièrement pour les pays émergents et en développement, suivis d'une phase de rattrapage de croissance.

Nous sommes donc mis au défi d'expliquer les mécanismes conduisant à ces résultats atypiques du modèle Imaclim-R, ce que la seconde partie de la thèse s'attache à faire.

Cela nous conduit, dans le chapitre 3, à construire une vision d'ensemble des mécanismes d'équilibre général à l'œuvre dans notre cadre de modélisation, et à proposer une maquette analytique faisant ressortir les paramètres déterminant les coûts macroéconomiques de court-terme. A travers ces deux approches, nous montrerons que les choix de représentation d'un monde « *second best* » sont au cœur des mécanismes de formation des coûts de l'atténuation. Nous mettrons ainsi en évidence deux paramètres centraux dans un monde de second rang et qui sont par définition ignorés dans un modèle où la macroéconomie est de premier rang :

- Les **rigidités des marchés du travail**, représentées dans notre modèle par des courbes salaires-chômage, conjuguées à l'inertie des capacités productives et aux anticipations imparfaites, sont à l'origine des coûts de court-terme très élevés.
- Les **anticipations imparfaites** sont également au cœur des mécanismes expliquant le profil atypique des coûts. En effet, la phase de rattrapage qui suit le pic

de pertes de court-terme s'explique par une moindre vulnérabilité des économies à l'augmentation des prix du pétrole, lorsque des politiques climatiques sont mises en œuvre. Dans un scénario de référence, les choix d'investissement sous anticipations imparfaites (en particulier n'anticipant pas de hausse brutale des prix du pétrole) conduisent à un parc productif et des équipements installés qui se révèlent inadaptés aux prix hauts du pétrole survenant brutalement lorsque les producteurs de pétrole se trouvent contraints par la déplétion des ressources. Dans un scénario de stabilisation, les prix du carbone, augmentant régulièrement, corrigent partiellement les anticipations des agents et induisent le développement et l'adoption de technologies décarbonées avant la phase de déplétion des ressources de pétrole, d'où un parc productif et des équipements installés plus adaptés à des prix hauts du pétrole.

Nous verrons que, dans un tel monde de second rang, les coûts de l'atténuation à court terme se distribuent selon le **rapport « contenu carbone de la production vs. salaires »** des économies. Ce rapport est beaucoup plus important dans les pays émergents et en développement que dans les pays de l'Annexe I, d'où des coûts largement supérieurs pour les premiers. Ceci montre que, au delà d'une posture politique, il y a aussi une rationalité économique dans le refus des pays émergents et en développement à entrer dans un accord climatique international fondé sur un prix du carbone unique. Cela change notablement la façon dont on peut aborder la discussion internationale sur le « partage du fardeau », puisque celui-ci ne dépend pas des seuls paramètres énergétiques, mais plus largement de mécanismes économiques tels que le fonctionnement des marchés du travail.

C'est pourquoi le chapitre suivant se concentre sur le rôle critique des imperfections du marché du travail dans la formation des coûts de l'atténuation du changement climatique. Les débats ont très largement polarisé l'attention sur les questions de changement technique, or nous montrons ici que la question des rigidités des marchés du travail est tout aussi importante. Lorsque les marchés du travail sont représentés comme très flexibles, les résultats du modèle se situent dans la fourchette des résultats de la littérature, soit moins de 2% de pertes de PIB mondial en 2030 pour une cible de stabilisation de la concentration de l'atmosphère à 550 ppm CO_2 -équivalents. Mais, lorsque les rigidités des marchés du travail sont prises en compte, les coûts de la stabilisation augmentent très significativement. Dans un second temps, l'article met en évidence des mesures d'accompagnement, des subventions sur le travail, qui assurent contre le risque de coûts de la stabilisation élevés en cas de rigidités importantes des marchés du travail. Cette vision complète la **vision habituelle** qui présente l'atténuation du changement climatique comme une **question de long-terme dépendant de la technologie, de l'innovation, des investissements et des changements comportementaux**. Ici, nous ajoutons la mise en garde que **l'atténuation est aussi une question de plus court-terme et un problème de transition sur les marchés du travail**.

La troisième partie de la thèse utilise le modèle Imaclim-R pour montrer à la fois les impasses de politiques climatiques fondées sur le seul prix unique du carbone et la nature du recadrage intellectuel à opérer pour faire émerger des architectures efficaces dans un

monde de second rang, en particulier à travers l'articulation entre politiques climatiques et politiques générales de développement.

Dans un premier temps, le chapitre 5 présente une **étude de cas sur l'Inde** soulignant le rôle des **sous-optimalités dans le secteur électrique** indien dans le coût des politiques climatiques. En particulier, il mettra en évidence un potentiel de **synergie entre politiques climatiques et développement**.

Enfin le dernier chapitre de la thèse propose une généralisation. En adoptant une approche de l'incertitude à travers un grand nombre de scénarios prospectifs, ce chapitre dégagera des résultats robustes qui permettent de fonder de façon différente la question de l'articulation entre politiques domestiques et architecture internationale, au delà d'un système cap-and-trade mondial. Il montre, dans un premier temps, pourquoi ce paquet « prix du carbone mondial plus transferts compensatoires » ne peut mener, par lui-même, à accord acceptable pour les pays émergents et en développement. Il insiste ensuite sur l'urgence de (i) la **redirection des investissements** dans les systèmes énergétiques, les infrastructures de transport et les bâtiments afin d'éviter un blocage des styles de développement de ces pays sur un chemin carboné, et de (ii) **mesures domestiques** (incluant des réformes fiscales) pour atténuer les effets distributifs négatifs de la transition vers des styles de développement sobres en carbone. Troisièmement, reconnaissant qu'aligner les politiques climatiques et les objectifs de développement restera impossible si le cercle de méfiance entre Annexe I et non-Annexe I n'est pas brisé, il avance des propositions sur le rôle potentiel d'un accord sur une **valeur sociale du carbone** pour **structurer une offre crédible de financement du développement**.

Deux annexes à cette thèse approfondissent la description du modèle Imaclim-R. L'annexe A donne les fondements théoriques du modèle ainsi qu'une description de ses composants. L'annexe B relate un test de **confrontation des résultats du modèle aux données historiques** sur une étude de cas : la résistance de l'économie indienne à la croissance des prix du pétrole sur la période 2003-2006. L'objectif est double : d'abord démêler la diversité des mécanismes et politiques à l'œuvre dans la réponse de l'économie de l'Inde à la montée des prix du pétrole, et ensuite valider notre modèle comme un outil capable de reproduire les données statistiques dans le court terme. Avec un paramétrage par défaut, le modèle prédit une diminution significative du taux de la croissance indienne qui n'est pas observée. Cependant l'écart est corrigé par l'introduction de trois mécanismes additionnels identifiés par le Fonds Monétaire International, à savoir la montée des exportations des produits du raffinage pétrolier, le déséquilibre de la balance commerciale permis par un large afflux de capitaux, et le report incomplet de la hausse des prix pétroliers vers les consommateurs indiens. Cet exercice est une première étape pour la validation du modèle, et procure d'intéressants aperçus sur la méthode de modélisation pertinente pour représenter la **réponse de l'économie à un choc**, aussi bien que sur la façon dont les mécanismes de court terme - et l'action politique - peuvent adoucir les impacts négatifs de chocs par les prix de l'énergie ou les politiques climatiques.

Les chapitres 4, 5 et 6, ainsi que les annexes A.1 et B, sont des articles qui s'insèrent

dans la progression de la thèse mais peuvent également être lu indépendamment. Le tableau donne les références complètes de ces articles et détaille la contribution personnelle de l'auteur de cette thèse à ces articles.

Tab. 1 – Articles faisant partie de la thèse.

	Références	Contributions de l'auteur de cette thèse
Chapitre 4	Guivarch, C., Crassous, R., Sassi, O. and Hallegatte, S. 2010. <i>The costs of climate policies in a second best world with labour market imperfections</i> . Accepted for publication in Climate Policy.	Réalisation des simulations, premier auteur
Chapitre 5	Mathy, S. and C., Guivarch. 2010. <i>Climate policies in a second-best world - A case study on India</i> . Energy Policy, Volume 38, Issue 3, March 2010, Pages 1519-1528.	Réalisation des simulations, auteur
Chapitre 6	Hourcade, J.-C. and C., Guivarch. 2010. What is missing to break the circle of despair? <i>Submitted to Climate Policy</i>	Réalisation des simulations, auteur
Annexe A.1	Sassi, O., R. Crassous, J. C. Hourcade, V. Gitz, H. Waisman, and C. Guivarch. 2010. <i>Imaclim-R : a modelling framework to simulate sustainable development pathways</i> . International Journal of Global Environmental Issues, Special Issue.	Contribution à la rédaction
Annexe B	Guivarch, C., S. Hallegatte, and R. Crassous. 2009. <i>The resilience of the Indian economy to rising oil prices as a validation test for a global energy-environment-economy CGE model</i> . Energy Policy, Volume 37, Issue 11, November 2009, Pages 4259-4266.	Réalisation des simulations, premier auteur

En définitive, ce travail de thèse s'articule autour de **deux piliers : un outil**, le modèle Imaclim-R, et **une problématique**, l'évaluation des coûts de l'atténuation.

Il faut avoir conscience que le développement d'un outil tel que le modèle Imaclim-R demande un investissement important et requiert nécessairement un travail d'équipe. Il convient donc de resituer mon travail de recherche qui s'inscrit dans un travail d'équipe et une longue histoire au CIREC. Ainsi la genèse du modèle Imaclim-R s'étend depuis des travaux précurseurs dans les années 90, qui se sont concrétisés par le développement de la version statique du modèle (le modèle Imaclim-S qui continue d'être développé au Cired et mobilisé sur des questions telles que les effets distributifs d'une taxe carbone en France à travers les travaux d'Emmanuel Combet, de Fred Gherzi et de Camille Thubin), jusqu'à la construction de la première version opérationnelle du modèle, phase qui s'est achevée par les thèses de Renaud Crassous (2008) et Olivier Sassi (2008). L'équipe de modélisation Imaclim-R s'est aujourd'hui considérablement élargie, tout comme le spectre des thématiques étudiées : depuis les implications macroéconomiques des contraintes sur les ressources pétrolières (travaux de Henri Waisman et Julie Rozenberg), les liens entre localisation des activités et besoins en transport (travaux de Henri Waisman, Fabio Grazi et Antoine Saglio), la question des villes et des usages résidentiels de l'énergie (travaux de Louis-Gaëtan Giraudet et Laure Lampin), jusqu'aux valeurs d'options des technologies décarbonnées (travaux de Adrien Vogt-Schilb et Ruben Bibas), la prise en compte des inégalités et des consommations d'énergie informelle (travaux de Meriem Hamdi-Cherif), la compétition pour l'usage des sols (travaux de Thierry Brunelle, François Souty, Julien Lefèvre et Patrice Dumas), ou encore les liens entre flux de capitaux et dynamiques d'investissement (travaux de Ruben Bibas et Julie Rozenberg). Mon travail, outre des développements du modèle à la marge et la dérivation d'un modèle national pour la France sur la base d'une architecture similaire, s'est concentré sur (i) l'exploration du modèle pour comprendre, analyser, décortiquer les mécanismes déterminant les résultats du modèle, y compris les déterminants « cachés », et ce sans concession, en affirmant qu'une bonne compréhension des limitations d'un modèle est un préalable à une utilisation pertinente de ses résultats ; (ii) l'utilisation du modèle pour produire des scénarios éclairant un certain nombre de questions en lien avec les négociations et les politiques climatiques.

Bibliographie

- [1] EU. Communication on community strategy on climate change, council conclusions. *European Council, Brussels*, 1996.
- [2] EU. Council of the european union, presidency conclusions, march 22-23, 2005.
- [3] D. K. Foley. The economic fundamentals of global warming. *Twenty-first century macroeconomics : Responding to the Climate Challenge*, Edward Elgar Publishing, 2008.
- [4] J. C. Hourcade. Les modeles dans les debats de politique climatique : entre le capitole et la roche tarpeienne? In *Les modeles du futur. Changement climatique et scenarios economiques : enjeux politiques et economiques*. Dahan-Dalmedico, Paris, la decouverte edition, 2007.
- [5] IPCC. *The IPCC 4th Assessment Report*. Technical report, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007, 2007.
- [6] M. J Lasky. *The Economic Costs of Reducing Emissions of Greenhouse Gases a Survey of Economic Models*. Congressional Budget Office, 2003.
- [7] L.B. Lindsey. *Science and technology in the Bush administration*. In : *Albert H. Teich, Stephen D. Nelson, Stephen J. Lita (Eds.)*. Association for the Advancement of Science (AAAS), Science and Technology Policy Yearbook. 2002.
- [8] W. Nordhaus. The challenge of global warming : Economic models and environmental policy. *Yale University, Department of Economics Discussion Paper* (http://nordhaus.econ.yale.edu/dice_mss_072407_all.pdf), 2007.
- [9] W. D Nordhaus. Greenhouse economics : count before you leap. *The Economist*, July 1990.
- [10] R. M Solow. Growth theory and after. *The American Economic Review*, pages 307–317, 1988.
- [11] R. M. Solow. Toward a macroeconomics of the medium run. *The Journal of Economic Perspectives*, pages 151–158, 2000.
- [12] N. Stern. Imperfections in the economics of public policy, imperfections in markets, and climate change. *Fondazione Eni Enrico Mattei Working Papers*, 2009.
- [13] Nicholas Stern. The stern review report on the economics of climate change. <http://eprints.lse.ac.uk/3149/>, 2006.
- [14] J. Tirole. Politique climatique : une nouvelle architecture internationale. *Conseil d'Analyse economique*.