



HAL
open science

De la macroéconomie des politiques énergie-climat à la convergence climat-développement

Sandrine Mathy

► **To cite this version:**

Sandrine Mathy. De la macroéconomie des politiques énergie-climat à la convergence climat-développement. Economies et finances. Université Grenoble Alpes, 2016. tel-01368366

HAL Id: tel-01368366

<https://hal.science/tel-01368366>

Submitted on 19 Sep 2016

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.

Mémoire de soutenance de l'Habilitation à Diriger les Recherches

De la macroéconomie des politiques énergie-climat à la convergence climat- développement

Présentée et soutenue publiquement le 15/09/2016 par

Sandrine Mathy

JURY

Alain Ayong Le Kama (Professeur - Université de Paris Ouest-Nanterre La Défense) - Rapporteur

Mireille Chiroleu Assouline (Professeur - Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne) - Rapporteur

Patrick Criqui (Directeur de recherche CNRS - GAEL,) - Directeur de recherche

Jean-Charles Hourcade (Directeur de recherche CNRS - CIRED)

Youba Sokona (Professeur Honoraire à l'University College of London - International Institute for Environment and Development)

Thomas Sterner (Professeur Université de Gothenburg) - Rapporteur

Contenu

Partie 1 - Curriculum vitae.....	5
I. Parcours de recherche.....	5
II. Publications	6
II.1. Publications dans des revues à comité de lecture	6
II.2. Chapitres d’ouvrages.....	7
II.3. Publications dans des revues sans comité de lecture	8
II.4. Autres publications.....	8
III. Communications à des colloques et conférences	10
III.1. Colloques avec actes	10
III.2. Colloques sur invitation.....	10
III.3. Colloques et interventions	11
IV. Travaux d’expertise	12
V. Projets de recherche nationaux ou internationaux	13
V.1. Projets de recherche nationaux	13
V.2. Projets de recherche internationaux.....	17
VI. Responsabilités scientifiques, administratives et animation de la Recherche	20
Partie 2 – Rapport de recherche	21
I. Analyse macroéconomique des politiques climatiques intégrant des éléments de second rang	21
I.1. Description d’Imacliim-R France	23
I.2. Spécificités d’Imacliim-R France par rapport aux autres modèles macroéconomiques utilisés pour l’évaluation de la transition énergétique [33]	29
I.3. Les enseignements d’Imacliim-R France pour l’évaluation des impacts macroéconomiques de la transition énergétique.....	37
I.4. Imacliim-R France comme soutien à la gouvernance de la transition énergétique.....	45
I.5. Bibliographie.....	62

II.	Pour des stratégies de lutte contre le changement climatique intégrées dans les politiques de développement	68
II.1.	Kyoto ou l’histoire d’un malentendu ?.....	68
II.2.	Le nœud gordien climat-développement.....	72
II.3.	Un menu d’engagements plutôt qu’un prix unique	78
II.4.	Bibliographie.....	84
III.	Conclusions et prolongements des recherches présentées.....	87
Partie 3 – Nouvelles perspectives de recherche		90
I.	Transition énergétique et ressources naturelles.....	91
I.1.	Transition énergétique et matériaux structurels et stratégiques	91
I.2.	Le gaz naturel dans la décarbonation : énergie de transition et risque de dépendance au sentier 95	
II.	Les hommes dans la transition énergétique	98
II.1.	Le consommateur : analyse des comportements de consommation énergétique et de leurs inflexions	98
II.2.	Le citoyen : scénarios, démocratie et transition énergétique.....	102
Conclusion générale		105
Annexe.....		107

Liste des abréviations

Annexe I	Pays de l'Annexe I de la Convention Climat (pays de l'OCDE en 1992 et pays en transition) devant respecter des objectifs chiffrés en terme de réduction ou de limitation des émissions de gaz à effet de serre du protocole de Kyoto
CCS	Technologie de capture et stockage du carbone
DNTE	Débat National sur la Transition Energétique (qui s'est déroulé en France en 2013)
Facteur 4 (F4)	Division par 4 des émissions de gaz à effet de serre pour la France en 2050 par rapport à 2005
GES	Gaz à effet de serre
G77	Le Groupe des 77 aux Nations unies est une coalition de pays en développement, conçue pour promouvoir les intérêts économiques et politiques collectifs de ses membres et créer une capacité de négociation accrue aux Nations unies. Il s'agit d'unir tous les pays en développement afin que, en dépit de leur diversité, ils puissent peser sur les décisions internationales. Créée par 77 pays, l'organisation a grandi et compte actuellement 134 pays membres
INDC	Intended Nationally Determined Contributions (ou Contributions volontaires déterminées au niveau national, en français). Désigne les contributions soumises par les parties aux négociations internationales sur le changement climatique en amont de la COP21
MDP	Mécanisme de Développement Propre
Non Annexe I	Les pays hors Annexe I de la Convention Climat ne sont pas soumis aux objectifs du protocole de Kyoto
PED	Pays en développement
PEN	Permis d'Emissions Négociables
ZSP	La zone de solidarité prioritaire est une liste de pays pour lesquels le gouvernement français considère que l'aide publique au développement peut produire un effet particulièrement utile au développement des institutions, de la société et de l'économie. Le gouvernement a mis au point cette liste en 1998.

Partie 1 - Curriculum vitae

I. Parcours de recherche

Après l'obtention en 1997 du diplôme d'ingénieur de l'École Nationale Supérieure des Techniques Avancées (ENSTA) à Paris, j'ai effectué un DEA (Diplôme d'Etudes Approfondies) en Economie de l'Environnement et des Ressources Naturelles (EHESS-ENGREF-Paris X) puis un doctorat au CIRED (CNRS-EHESS, UMR 8568, Centre International de Recherche en Environnement et Développement), sous la direction de Jean-Charles Hourcade (DR CNRS), dont le sujet était « L'intégration des pays en développement dans les politiques climatiques – Application au secteur de la production d'électricité et au secteur des transports en Inde ». Cette thèse commencée en 2000 a été soutenue le 22 mars 2004, devant un jury présidé par Emilio La Rovere (professeur à l'Université de Rio de Janeiro), composé de Michel Colombier (chargé de recherche CIRAD), Dominique Finon (DR CNRS) et de mon directeur de thèse Jean-Charles Hourcade. Le jury a accordé la mention très honorable, avec les félicitations à l'unanimité, à ce travail de thèse.

A la suite de ce doctorat, j'ai été recrutée comme Chargée de Recherche 2^e classe au CNRS en octobre 2004 sur un poste interdisciplinaire ouvert en section 10 (Milieux fluides et réactifs : transports, transferts, procédés de transformation) et affectée dans un laboratoire de la section 37 (économie et gestion). Je fus affectée au CIRED et par la suite, en 2006, promue Chargée de Recherche 1^{re} classe.

En 2011, pour raisons personnelles et désir de mobilité, j'ai rejoint l'équipe EDDEN (Economie du Développement Durable et de l'Energie) du laboratoire PACTE (Politiques publiques, Actions Politiques, Territoires, UMR 5194). Au 1^{er} janvier 2016, l'équipe EDDEN a intégré le laboratoire GAEL (Laboratoire d'Economie Appliquée de Grenoble), ce qui a donné lieu à la création d'une UMR CNRS-INRA-UGA- Grenoble-INP. Je suis affiliée à l'axe énergie de ce nouveau laboratoire qui en comprend trois : Energie, Consommation et production durable, et Innovation.

II. Publications

II.1. Publications dans des revues à comité de lecture

- [1] BOUCHER O., BELLASSEN V., BENVENISTE H., CIAIS P., CRIQUI P., GUIVARCH C., LE TREUT H., MATHY S., SÉFÉRIAN R. (2016) What climate research after the Paris Agreement?, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(27):7287-7290.
- [2] MATHY S., CRIQUI P., HILLEBRANDT K., FISCHEDICK M., ECKSTEIN S. (2016) Uncertainty management and the dynamic adjustment of Deep Decarbonization Pathways, *Climate Policy*, published online : 31 May 2016. DOI: 10.1080/14693062.2016.1179618 – CNRS2
- [3] BIBAS R., MATHY S., FINK M. (accepté) Elaboration et analyse macroéconomique d'un scénario bas carbone " acceptable ", *Economie et Prévisions* – CNRS3
- [4] MATHY S., BLANCHARD O. (2015) Proposal for a poverty-adaptation-mitigation window within the Green Climate Fund, *Climate Policy*, Published online : 09 Jun 2015 DOI: 10.1080/14693062.2015.1050348 – CNRS2
- [5] MATHY S. (2015) Pour la création d'une fenêtre de financement pauvreté-adaptation-atténuation dans le Fonds Vert Climat, *Natures Sciences Sociétés*, 23, suppl. « Les enjeux de la conférence de Paris. Penser autrement la question climatique », pp. 29-40 – CNRS4
- [6] MATHY S. (2015) Des négociations internationales aux politiques nationales : le positionnement ambivalent de l'Inde sur le changement climatique, *Mondes en Développement*, 43(169), pp. 139-160 – CNRS4
- [7] MATHY S., FINK M., BIBAS R. (2015) Process-oriented scenarios : participative low carbon scenarios building for France, *Energy Policy*, 77, pp. 176-190 – CNRS2
- [8] MATHY S., FINK M., BIBAS R. (2014) Repenser le rôle des scénarios : construction participative de scénarios bas carbone pour la France, *Revue d'Economie Industrielle*, (148), pp. 69-103 – CNRS3
- [9] GUIVARCH C., MATHY S. (2012) Energy decoupling in a second best world. A case study in India, *Climatic Change*, 113(2), pp. 339-356 – CNRS3
- [10] MATHY S., FINK M., BIBAS R. (2011) Quel rôle pour les scénarios Facteur 4 dans la construction de la décision publique ?, *Développement Durable et Territoires*, 2(1), dossier «Facteur 4 : le chantier social et politique»– CNRS4

[11] MATHY S., GUIVARCH C. (2010) Climate policies in a second-best world - A case study on India, *Energy Policy*, 38(3), pp. 1519-1528 –CNRS2

[12] MATHY S. (2007) Urban and rural policies and the climate change issue : the French experience of governance, *Environmental Sciences*, 4(03), pp. 159- 169.

[13] MATHY (S.) (2004) Comment intégrer les pays en développement dans des politiques climatiques basées sur un système de quotas d'émissions ?, *Revue Tiers Monde*, (177), pp. 85- 105.

[14] DE GOUELLO (C.), MOLLON (P.), MATHY (S.) (2002) Rent sharing in the Clean Development Mechanism : The Case of the Tahamanu Hydroelectric Project in Bolivia, *Greener Management International*, (39), pp. 109-118.

[15] MATHY (S.) (2002) L'intégration des PED dans les politiques climatiques : entre recherche d'efficacité économique et opportunité de développement propre, *Economies et Sociétés. Cahiers de l'ISMEA*, 36 (6), Hors Série n° 38, pp. 915-944 – CNRS4

[16] MATHY (S.), HOURCADE (J.C.) et DE GOUELLO (C.) (2001) Clean development mechanism: leverage for development ? *Climate Policy*, 1(2), pp. 251-268 CNRS2

II.2. Chapitres d'ouvrages

[17] MATHY, S., CRIQUI, P. & HOURCADE, J. C. (2014). France. In : *Pathways to deep decarbonization : interim 2014 report..* Paris, Sustainable Development Solutions Network ; IDDRI, pp. 85-97.

[18] MATHY, S., (2013) Une démarche de scénarios participatifs et quantitatifs sur le changement climatique et la réduction des émissions de carbone. In : *Regards croisés sur la gouvernance du très long terme - Biodiversité, changement climatique, déchets radioactifs, débris spatiaux, stockage de CO₂*. Paris, La Documentation Française, pp. 108-112.

[19] MATHY S., (2011) Comment réduire les émissions de gaz à effet de serre ? In *Climat : une planète et des hommes* Quelle influence humaine sur le réchauffement climatique ? Michel Petit et Aline Chabreuil, dirs. Edition Le Cherche Midi.

[20] HOURCADE J.C. SHUKLA P.R., MATHY S. (2009) Untying the Climate – Development Gordian Knot : Economic options in a politically constrained world. In : *The Design of Climate Policy*, R. Guesnerie and H. Tulkens, eds. MIT Press, pp.75-99.

[21] MATHY S., HOURCADE J.C. (2007) An international coordination regime come what may. In : *Energy and climate change: the main analyses of Regards sur la Terre*. An annual publication on sustainable, P. Jacquet and L. Tubiana, dirs. IDDRI, Presses de Sciences Po, pp. 63-70.

[22] MATHY S., HOURCADE J.C. (2006) Un régime de coordination malgré tout. In : *Regards sur la Terre*. Presses de Sciences Po, pp. 201-213.

[23] DE GOUELLO C., MOLLON P., MATHY S. (2005) Rent sharing in the Clean Development Mechanism: The Case of the Tahamanu Hydroelectric Project in Bolivia. In *The Business of Climate Change, Corporate Responses to Kyoto*, K. Begg, F. van der Woerd and D. Levy, eds.

II.3. Publications dans des revues sans comité de lecture

[24] CRIQUI P., MATHY S. (à paraître) Vers une gestion dynamique de la transition énergétique en France, *Revue Francophone du Développement Durable*. HS n°4, Les changements climatiques, Décembre.

[25] ALAZARD-TOUX, N., CRIQUI, P., DEVEZEAUX DE LAVERGNE, J.-G., HACHE, E., LE NET, E., LORNE, D., MATHY, S., MENANTEAU, P., SAFA, H., TEISSIER, O. & TOPPER, B. (2014). Les scénarios de transition énergétique de l'ANCRE, *Revue de l'énergie*, (619), pp. 189-210.

[26] DAVID B., DE LATTRE-GASQUET M., MATHY S., MONCOMBLE J.-E., ROZENBERG J., (2014) Prospective énergétique : le possible, le souhaitable et l'acceptable, *Futuribles*, (398).

[27] MATHY S., (2012). Le changement climatique mérite débat, *Revue Projet*, numéro spécial : Donner la parole aux générations futures, (330), pp. 32-36.

[28] MATHY S., (2007) Développement rime-t-il avec environnement ?, *Pour la Science*. N° 54 - Janvier – Mars. Dossier spécial Climat : comment éviter la surchauffe ?

[29] MATHY S. (2005) Le mécanisme de développement propre : à la recherche d'une synergie entre environnement et développement, *Liaison Energie Francophonie*, (66-67), pp. 136-140.

[30] CRASSOUS R., MATHY S. (2005) Peut-on étendre le système des quotas échangeables aux PED ?, *Liaison Energie Francophonie*, (66-67), pp. 129-135.

II.4. Autres publications

[31] LE TREUT H., BOUCHER O., BENVENISTE H. et al. (2015) Groupe Interdisciplinaire sur les Contributions Nationales Working Paper. IPSL climate modelling center, Scientific Note N° 32.

- [32] CRIQUI P., MATHY S., HOURCADE J.C (2015) Pathways to deep decarbonization in France, SDSN, IDDRI, EDDEN, CIRED, Sept., 60 p.
- [33] BOITIER B., CALLONNEC G., DOUILLARD P., ÉPAULARD A., GHERSI F., MASSON E., MATHY S. (2015) Les modèles macroéconomiques français, quels enseignements pour la transition énergétique ?, Document de Travail N°2015-05/octobre. France Stratégie, 32 p.
- [34] ALAZARD-TOUX N., CRIQUI P., DEVEZEAUX DE LAVERGNE J.-G., coords. ; MATHY S., MENANTEAU P., contributeurs (2014). *Scénario de l'Ancre pour la transition énergétique : rapport 2013*. Paris, Alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie, 117 p.
- [35] EDENHOFER O., et al. (2014) Contribution à Euro-CASE Policy Position Paper Reform Options for the European Emissions Trading System (EU ETS), 46 p.
- [36] MATHY S., (2014) Le positionnement de l'Inde dans les négociations internationales sur le changement climatique, Policy Brief Asia Centre, 13 p.
- [37] MATHY S., GUIVARCH C. (2009). Implementing Climate and Development Policy in India. Climate Science and Policy, Centro Euro-Mediterraneo per i Cambiamenti Climatici. disponible sur <http://www.climatescienceandpolicy.eu/2009/11/implementing-climate-and-development-in-india/>
- [38] CHETAÏLLE A., MATHY S. (2008) Un besoin sans précédent en transfert de technologies, dans le cadre de la publication : vers un accord équitable pour le climat pour l'après 2012, propositions du Réseau Action Climat-France, pp. 39-46
- [39] MENON D., MATHY S., (2007) Aligning Development, Air Quality and Climate Policies for Multiple Dividends, CSH Occasional Paper. New Delhi, French Research Institutes in India.
- [40] CRASSOUS R., HOURCADE J.-C., MATHY S., SASSI O. (2006) Déterminants non énergétiques des émissions de gaz à effet de serre. Paris, IDDRI.
- [41] CRASSOUS R., HOURCADE J.-C., MATHY S., SASSI O. (2006) Un prix unique du carbone dans un monde hétérogène ? Jalons pour une réinterprétation de Kyoto. Paris, IDDRI.
- [42] CRASSOUS R., J.-C. HOURCADE, O. SASSI, V. GITZ, S. MATHY, M. HAMDÏ-CHERIF (2006) Imacim-R : a modeling framework for sustainable development issues. Working paper CIRED.
- [43] HOURCADE J.C. SHUKLA P.R., MATHY S. (2005) Untying the Climate – Development Gordian Knot : Economic options in a politically constrained world, Working Paper CIRED.

III. Communications à des colloques et conférences

III.1. Colloques avec actes

MATHY S., BIBAS R., FINK M. (2013) Participative elaboration and economic assessment of an « acceptable » low carbon scenario. *ECEEE (European Council for an Energy Efficiency Economy) Summer Study* June: Rethink, renew, restart, Côte d'Azur, France.

MATHY S. (2012) Elaboration de scénarios bas carbone socialement acceptables, Conférence *Les scénarios économiques du changement climatique : entre utopie et performativité*, dans le cadre du Projet ANR ClimaConf, 10 avril 2012, Paris.

MATHY S., GUIVARCH C. (2009) Climate policies: what if emerging country baseline were not so optimistic ? – A case study related to India. *ECEEE (European Council for an Energy Efficiency Economy) Summer Study*, 1-6 June, Côte d'Azur, France.

BLANCO C., ENGLERYD A., MATHY S. (2001) Energy Substitution, Transport Infrastructure and Energy Efficiency under the Clean Development Mechanism - Will the baseline make a difference ? *ECEEE (European Council for an Energy Efficiency Economy), Summer Study*, June, Antibes, France.

III.2. Colloques sur invitation

MATHY S. (2016) Construction de scénarios pour l'évaluation des politiques climatiques : retour sur les méthodes et enjeux, Séminaire du GREMUTS : *Analyse prospective et écriture de scénarios: Quels enjeux pour les langues et cultures de spécialité?*, 8 janvier 2016, Saint Martin d'Hères

MATHY S. (2015) Intercomparaison des compteurs d'INDC, Science workshop on INDCs and the 2°C objective, 3 novembre 2015, Paris

MATHY S. (2014) Deep decarbonization scenarios for France, *IARU Congress*, 22 octobre 2014, Copenhague

MATHY S. (2012) Social Acceptance in Quantitative Low Carbon Scenarios, *Conférence sur la gouvernance du très long terme*, 9 février 2012, Muséum d'Histoire Naturelle, Paris.

BIBAS R., MATHY S. (2011) Dynamiques d'investissement et de maîtrise de la courbe de charge dans le système électrique français. Journée De La Chaire Modélisation Prospective 2011 *Prospective pour les enjeux Energie-Climat*, 11 Octobre 2011, Jardin Tropical, CIRED, Paris, France.

MATHY S. (2010) Les outils économiques des politiques climatiques, *journée interdisciplinaire développement durable – changements climatiques et aspects sociétaux* – Sciences Po Lille, 2010

MATHY S. (2008) Climate Change and Technological Transfer. International Workshop on *Modeling Technology Oriented RD&D Strategic Cooperation for Climate Change Mitigation : Methodological Issues and Alternative Policy Scenarios* ? 17-18 mars, Venise, Italie.

III.3. Colloques et interventions

MATHY S. (2015) Les apports d'une construction participative de scénarios, *Séminaire Economie et Environnement*, CGDD-Commissariat Général au Développement Durable, 26 Novembre 2015

MATHY S., BLANCHARD O. (2015) Proposal for a poverty-adaptation-mitigation window within the Green Climate Fund, session SDGs and Climate Agreement, *Our Common Future under Climate Change*, 10 July 2015, UNESCO, Paris

MATHY S., GUIVARCH C. (2010) Climate policies in a second-best world - A case study on India' *Fourth World Congress of Environmental and Resource Economists*, Montreal, June 28 to July 2, 2010.

MATHY S., GUIVARCH C. (2009) What if energy decoupling of emerging economies were not so spontaneous ? An illustrative example on India, *Symposium on Climate Change Copenhagen*, March 10-12th 2009, Copenhagen, Denmark.

CRASSOUS R., HOURCADE J.-C., MATHY S., SASSI O. (2006) Déterminants non énergétiques des émissions de gaz à effet de serre, *Conférence IDDRI*, 4 avril 2006

CRASSOUS R., HOURCADE J.-C., MATHY S., SASSI O. (2006) Un prix unique du carbone dans un monde hétérogène ? Jalons pour une réinterprétation de Kyoto, *Conférence IDDRI*, 4 avril 2006

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.

BOEMARE C, HOURCADE J.C., MATHY S. (2005) Le Protocole de Kyoto face au nœud gordien environnement/développement : bases économiques pour une levée des malentendus. *Journées de l'AFSE*, Clermont-Ferrand 2005, 19 et 20 mai.

MATHY S., de GOUVELLO C. (2000) Developmental Additionality of the Clean development Mechanism - *6th Conference of the Parties - Side event - La Haye (Pays Bas)*, Novembre 2000.

MATHY S., de GOUVELLO C., HOURCADE J.C. (2000) Clean Development Mechanism from a Flexibility Mechanism to a Leverage on Development, Communication à la *European Association of*

Environmental and Resource Economists Tenth Annual Conference, University of Crete, Department of Economics, 29 June-3 July.

MATHY S. (2000) The Clean Development Mechanism : the possible impact on the electric sector, *International Conference on Sustainable Energy and Environment*, BSES Management Institute, Mumbai (India), August.

MATHY S., de GOUVELLO C., HOURCADE J.C. (1999) Le Mécanisme de Développement Propre : Mécanisme de flexibilité pour les engagements de réduction d'émission des pays de l'Annexe1 ou levier pour le développement des pays en voie de développement, *Les journées du PIREE*, 1 et 2 décembre 1999, Strasbourg.

IV. Travaux d'expertise

Groupe GICN (Groupe Interdisciplinaire sur les Contributions Nationales) piloté par Hervé Le Treut, climatologue, directeur de l'IPSL (Institut Pierre Simon Laplace) pour le MEDDE (ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie) depuis le printemps 2015. Le groupe GICN, réunissant 14 chercheurs issus de plusieurs disciplines (économie - EDDEN et CIREC, climatologues - IPSL, LMD, LSCE, Météo-France et agronomie - INRA), visait à fournir de l'expertise au MEDDE en amont de la COP21, notamment en rapport avec l'évaluation des INDC. Ceci a donné lieu à la rédaction de plusieurs fiches (Prix du carbone et contributions nationales, Comparaison et évaluation des compteurs d'INDC, Les émissions négatives, INDC Chine, INDC Europe). Le GICN a organisé un workshop le 3 novembre 2015 réunissant l'ensemble des travaux internationaux de recherche réalisés sur l'évaluation des INDC et a publié un working paper IPSL [\[31\]](#) décrivant ses contributions et résultats d'évaluation des INDC en novembre 2015, à quelques jours du début de la COP21 et une publication dans *PNAS* [\[1\]](#) sur les priorités de recherche sur le climat à la suite de l'Accord de Paris

Participation à l'**exercice de comparaison des modèles macroéconomiques français utilisés dans le cadre de la transition énergétique**, France Stratégie, 2015. Le modèle Imaclim-R France a été intégré à l'exercice aux côtés des 3 autres modèles Three-ME (Ademe, OFCE), Mesange (Direction du Trésor et INSEE) et Nemesis (Seureco) visant à étudier le comportement des modèles macroéconomiques utilisés dans le cadre de la transition énergétique française lors de chocs dans le secteur énergétique ou fiscal. Ces travaux ont permis la publication du document de travail [\[33\]](#): Les modèles macroéconomiques français, quels enseignements pour la transition énergétique ?, Document de Travail N°2015-05/octobre, France Stratégie.

Contribution au **Groupe de Travail 2 du Débat National sur la Transition Énergétique (DNTE)** : La contribution a consisté à verser deux scénarios au DNTE. Ces scénarios élaborés avec Imaclim-R France

étaient les seuls, parmi la quinzaine de scénarios intégrés au débat, construits avec un modèle macroéconomique. Ils émanaient du travail de construction participative de scénarios dans le cadre du projet Encilowcarb (voir section sur [les programmes de recherche internationaux](#) ainsi que la [section 1.5.1 de la partie 2](#)) et consistaient en un scénario de référence et un scénario Facteur 4. Ces scénarios sont consignés dans le rapport du groupe de travail n°2 sur les scénarios du DNTE : « Quelle trajectoire pour atteindre le mix énergétique en 2025 ? Quels types de scénarios possibles à horizons 2030 et 2050, dans le respect des engagements climatiques de la France ? » Rapport du groupe de travail n°2 du Conseil national sur la transition énergétique. 72 p., mars 2013.

Contribution à la **Commission Energie 2050** présidée par J. Percebois (Univ. Montpellier). La contribution a consisté en la construction de scénarios avec Imaclim-R France, croisant différentes hypothèses de déclassement des centrales nucléaires existantes (non prolongation, prolongation d'une partie du parc, prolongation de la totalité du parc), différentes hypothèses de coûts des technologies de production d'électricité et différents scénarios de mesures de transition énergétique vers le Facteur 4. Ceci a donné lieu à la rédaction d'une note : Bibas, Mathy, Hourcade, 2012. Impact macroéconomique du rythme de déclassement des centrales nucléaires repris dans le Rapport Energie 2050 (<http://www.strategie.gouv.fr/content/rapport-energies-2050>)

Contribution au **Comité Trajectoires 2020-2050** présidé par C. de Perthuis, professeur associé d'économie à l'université Paris-Dauphine, septembre 2011. Ce comité visait à analyser les coûts de réduction des émissions de GES de différentes trajectoires temporelles de réduction des émissions, notamment une trajectoire « *early action* » vs « *delayed action* ». Des scénarios Facteur 4 intégrant des politiques et mesures sectorielles et fiscales ont été construits avec Imaclim-R France et ont permis de montrer les impacts de l'inertie des systèmes techniques sur les trajectoires de réduction d'émission, et des politiques et mesures sectorielles sur le niveau de taxe carbone requis pour répondre à une trajectoire prédéfinie.

V. Projets de recherche nationaux ou internationaux

V.1. Projets de recherche nationaux

V.1.1. L'équité dans le régime climatique post-2020

Partenariat PACTE-EDDEN, Asia-Centre (coordinateur), E&E Consultant, Centre de Sciences Humaine de New Delhi et Ecoequity, financé par le CGSP – Février-décembre 2014

Ce projet visait à revenir sur la place de l'équité dans les négociations internationales, les principes autour desquels les débats se sont construits et le positionnement des Etats. Des études de cas sur la manière dont l'équité a été prise en compte pour d'autres enjeux de gouvernance internationale

(OMC, sécurité alimentaire, couche d'ozone) visaient à élaborer de nouvelles propositions sur ces questions en amont de la COP21. Ceci déboucha sur la proposition de création d'une fenêtre de financement pauvreté-adaptation-mitigation au sein du Fonds Vert pour le Climat (cf publication [\[4\]](#) et [\[5\]](#), et [section 2.3.b de la partie 2](#)).

V.1.2. Coordination du projet VAETH – Vers une Autonomie Énergétique des Territoires insulaires et Isolés

Projet financé par le Programme Energie du CNRS. Partenariat entre le CIRED (coordinateur) et le CERTOP – 2009-2012

Le projet VAETH propose une approche pluridisciplinaire (socio-anthropologie, évaluation économique) permettant de définir et d'évaluer des politiques adaptées au contexte des territoires insulaires/isolés dans le but d'atteindre une autonomie énergétique dans ces territoires. Le projet s'est focalisé sur le territoire de l'île de la Réunion.

L'approche sociologique sur la base d'entretiens (ménages, tertiaire et institutions) a permis :

1. la caractérisation des obstacles à la réalisation de l'autonomie énergétique : notamment un manque de gouvernance globale sur les questions énergétiques : réseau d'acteurs dense avec de nombreux partenariats entremêlant les niveaux régionaux, départementaux et nationaux ; nombreuses structures évoquant un effet mille où les compétences ne sont pas reconnues et où les prises de décision s'organisent autour d'affinités et d'ententes informelles.
2. l'établissement d'une nomenclature sur la base d'une grille d'analyse Forces, Faiblesses, Opportunités, Menaces des 3 types de projets/visions/logiques dans lesquels les acteurs inscrivent l'autonomie énergétique, mais qui semblent se confronter : i) une logique de développement réglementaire où les lois et normes permettront de faire évoluer la société dans un cadre défini par avance ; ii) une logique de développement technologique, où le tout technologique permettra de résoudre les problèmes liés à la production ou à la consommation d'énergie ; iii) une logique de développement culturel, basée sur le changement des mentalités et des comportements pour intégrer de nouveaux usages de l'énergie.

L'enjeu de la réussite d'un projet d'autonomie énergétique est alors que chaque vision ne soit pas une solution exclusive à un problème spécifique, mais une solution partielle à un problème commun. La valorisation énergétique de la bagasse et éventuellement le développement d'une variété de canne-énergie apparaît ainsi s'inscrire dans chacune de ces 3 visions. La prospective économique s'est focalisée sur les potentialités socio-technico-économiques de la bagasse. Pour cela, une Matrice de Comptabilité Sociale a été développée pour la Réunion. Différents soutiens à la filière canne ont été

simulés (subventions européennes ou nationales sucrières, tarifs d'achat d'électricité produite à partir de bagasse...) de manière à évaluer les impacts sur les émissions de GES, la croissance, les coûts de production des différents secteurs, le pouvoir d'achat des différentes classes de revenus, la balance commerciale et la facture énergétique.

V.1.3. Scénarios sous contrainte carbone

Projet financé par la Fondri (Entreprises pour l'Environnement et l'IDDRI), avec le CIRED et le LEPII-EDDEN – 2005-2007

L'étude a examiné quel serait l'impact, sur les principaux secteurs industriels, d'une contrainte carbone visant une stabilisation à 450 ppm CO₂ à la fin du siècle. En plus des secteurs énergétiques, l'étude s'est concentrée sur les secteurs de production d'acier, d'aluminium, de ciment et de verre plat, parce que ces matériaux sont des éléments essentiels de la satisfaction des besoins dans les domaines des transports et de l'habitat. Sources importantes d'émissions de GES, ces industries sont susceptibles d'être fortement impactées par la contrainte carbone globale. Une des originalités de l'étude est de poser la question des transformations industrielles non seulement du côté des technologies de production, mais aussi du côté de la demande adressée à ces secteurs. Une forte contrainte carbone est en effet susceptible d'induire des bifurcations importantes sur les besoins de matériaux, *via* les modifications du bâti, des infrastructures, des réseaux de transport d'énergie, des véhicules. Les travaux ont également exploré d'autres options de développement, impliquant un ensemble de mécanismes d'incitation dépassant la seule mise en place d'un prix du CO₂, en se concentrant sur le rôle des infrastructures et de l'organisation spatiale des activités. Ces éléments reflètent effectivement les choix dont disposent les gouvernements pour influencer le contenu énergétique de leur développement, question cruciale notamment dans les pays émergents. L'ambition de l'étude exigeait de représenter explicitement tant les potentiels technologiques de réduction des émissions que les effets d'interaction intersectoriels et macroéconomiques ; elle a conduit au développement d'une plateforme de modélisation hybride mettant en dialogue le modèle énergétique POLES (développé à EDDEN) et le modèle d'équilibre général Imacim-R Monde (développé au CIRED), en y incluant des modules spécifiques aux secteurs industriels étudiés. L'appropriation du travail de recherche par les industriels et l'encadrement de la modélisation des secteurs industriels ont été facilités par un dialogue itératif en comité de pilotage tout au long de l'étude.

V.1.4. Analyse comparative des outils de mise en œuvre des accords multilatéraux sur l'environnement dans les pays membres de la ZSP

Partenariat CIRED, Solagral (coordinateur), CIRAD, financé par la Direction générale de la coopération internationale et du développement du ministère des Affaires étrangères. N° 2000/2243. 88 p. - 2000

L'objet du projet était d'évaluer dans quelle mesure les pays de la Zone de Solidarité Prioritaire (ZSP) sont en mesure de tirer parti des instruments nouveaux issus des accords multilatéraux sur l'environnement (AME) qui ont vu le jour depuis la Convention de Rio en 1992. Ces pays sont globalement mal préparés pour utiliser pleinement le potentiel ouvert par ces nouveaux instruments, alors qu'une grande partie des enjeux environnementaux planétaires se jouent sur leurs territoires.

Un des enjeux est de développer des capacités de bonne gouvernance, d'adapter les cadres institutionnels pour pouvoir utiliser ces instruments, et de sortir de certaines situations de schizophrénie juridique en matière de droit d'usage du sol. Nous retrouvons là une partie des objectifs traditionnels de l'aide publique au développement, dont de nombreux pays du Sud craignent qu'elle ne s'efface au profit des nouveaux instruments fondés sur des dispositifs privés bilatéraux, à l'image du MDP. Par rapport aux outils classiques, comme les systèmes fiscaux, qui restent largement du ressort de la souveraineté des États, ceux-ci sont sous la tutelle conjointe de la communauté internationale à travers ses organismes spécialisés, des firmes internationales qui investissent et des États des pays bénéficiaires des flux d'investissement. Le champ de la conditionnalité s'élargit à l'évaluation de la gouvernance environnementale des pays bénéficiaires. Dans le cadre de cette conditionnalité élargie, les politiques de l'environnement, mais aussi les autres politiques sectorielles interagissant sur la biodiversité et le changement climatique global, seront placées sous le faisceau d'une évaluation continue. Ceci peut constituer une opportunité pour les pays qui sauront mettre progressivement en cohérence les différents aspects de leurs politiques publiques et combiner la gamme élargie des instruments rendus disponibles pour améliorer non seulement la gestion de leur environnement, mais également l'efficacité de leurs institutions.

V.1.5. Mécanisme de Développement Propre et politiques et mesures domestiques – Volet I - MDP et objectifs nationaux de développement : le cas du secteur énergétique

Partenariat CIREN et CIRAD, financé par le ministère de l'Environnement, Convention Médias n°2/99. 79 p. – 1999

L'objet du projet était d'établir qu'il est possible d'étudier le MDP non seulement en tant que mécanisme de flexibilité pour les Pays de l'Annexe 1, mais également sous l'angle de la contribution au développement du mécanisme. Le MDP peut générer un effet levier sur les ressources mobilisables pour la mise en œuvre des politiques économiques au service des priorités de développement, tout en favorisant des choix technologiques moins intensifs en carbone. Le potentiel pour cet effet levier réside dans la coexistence de trois types de bénéfices engendrés par une telle articulation : le revenu des crédits d'émission, le bénéfice commercial normal des projets et la contribution de ces projets aux

objectifs des politiques publiques de développement. Nous avons construit une représentation micro-économique de l'articulation entre le niveau micro-économique de la décision concernant un investissement industriel unique et l'accroissement du flux global d'investissement et de revenus suscité par l'ensemble des projets MDP au sein d'une économie nationale. L'application de cette formalisation au secteur électrique indien avec quantification à l'aide du modèle de minimisation du coût du système énergétique Markal-Inde, en collaboration avec l'équipe du professeur Shukla de l'Indian Institute of Management d'Ahmedabad, montre que l'effet de levier est significatif et que l'intérêt économique du MDP pour le pays hôte va très au-delà d'un partage de la valeur des crédits avec les investisseurs du Nord que le MDP permet d'attirer.

V.2. Projets de recherche internationaux

V.2.1. Deep Decarbonisation Pathway Project (DDPP)

Projet initié et coordonné par le Sustainable Development Solutions Network (SDSN) et l'Institut pour le développement durable et les relations internationales (IDDRI) – 2014-2015

DDPP est une initiative collaborative pour comprendre et montrer comment des pays peuvent s'engager individuellement dans une transition bas carbone et le monde s'engager collectivement dans la limitation du réchauffement climatique à 2°C. Le projet DDPP réunit des centres de recherche issus des 15 pays constituant les plus gros émetteurs de gaz à effet de serre représentant collectivement 70 % des émissions mondiales de GES : Australie, Brésil, Canada, Chine, France, Allemagne, Inde, Indonésie, Japon, Mexique, Russie, Afrique du Sud, Corée du Sud, Royaume Uni, et Etats-Unis. Chaque pays construit alors ses propres scénarios nationaux de décarbonation.

Je suis la principale contributrice du rapport France qui évalue, avec le modèle macroéconomique Imacim-R France, deux trajectoires contrastées de décarbonation à l'horizon 2050 pour la France, l'une misant sur une baisse ambitieuse de la demande d'énergie, l'autre sur une forte décarbonation de l'énergie. Le rapport analyse les politiques sectorielles à mettre en œuvre et leurs obstacles, et mène une évaluation économique de ces deux trajectoires. La prise en compte des incertitudes propres à chacune de ces trajectoires montre qu'une stratégie axée sur une forte réduction de la demande est plus robuste qu'une stratégie privilégiant la décarbonation de l'offre énergétique : en réduisant le besoin en énergie décarbonée, elle laisse plus de marge de manœuvre en cas d'échec des politiques de réduction de la demande. Enfin, même si la décarbonation de l'économie génère de la croissance et de l'emploi sur le moyen terme, des coûts d'ajustement sur le court terme apparaissent, ce qui est en mesure d'entraver toute décision politique dans ce domaine. Des propositions sont faites pour permettre de réduire ces coûts d'ajustement et favoriser ainsi le déclenchement rapide de la transition énergétique.

V.2.2. EncilowCarb Engaging Civil Society in Low Carbon Scenarios

Projet financé par le 7^e programme cadre de recherche de la Commission européenne, coordonné par le Réseau Action Climat – France et partenaires ; CIRED , le PIK (Potsdam Institute for Climate Impact Research), Germanwatch , INFORSE-Europe – 2009-2012

Le projet EncilowCarb visait à élaborer en France (avec le RAC-F et le CIRED) et en Allemagne (avec Germanwatch et le PIK) des scénarios bas carbone élaborés de manière participative avec des parties prenantes. Les ONG impliquées dans le projet étaient chargées de superviser le processus de participation avec les parties prenantes et les centres de recherches de construire des modèles nationaux permettant l'évaluation économique de scénarios bas carbone. C'est ainsi que le modèle de simulation Imaclim-R France a pu être développé. En Allemagne, le PIK s'est appuyé sur la construction du modèle d'optimisation intertemporel Remind-D.

V.2.3. Climat et développement : réconciliation entre contraintes environnementales et politiques nationales de développement

Partenariat CIRED, Indian Institute of Management of Ahmedabad (Inde), COPPE (Brésil), financé par le ministère de l'Environnement, programme GICC – 2005-2007

Ce projet visait à déterminer les modalités de politiques climatiques multilatéralement coordonnées susceptibles d'inciter les pays en développement (PED) à prendre des engagements de réduction de leurs émissions de gaz à effet de serre (GES). Le projet a mobilisé le modèle Imaclim-R Monde ainsi que des analyses sectorielles dans les pays concernés. Après avoir montré pourquoi les transferts de revenus obtenus *via* les mécanismes actuels du protocole de Kyoto ne sauraient, à eux seuls, assurer le respect de ce principe, la recherche s'est attachée à :

1. cerner, dans le cas du Brésil et de l'Inde présentant des systèmes énergétiques et modes d'occupation de l'espace très contrastés, les points de contradiction entre baisse des profils d'émissions de GES et développement : problèmes redistributifs, caractère incontournable de la valorisation du charbon en Inde et valorisation économique de la forêt amazonienne par la biomasse;
2. détecter, pour ces deux pays, les types d'obstacles au développement dont la levée serait facilitée par des choix moins intensifs en carbone, et évaluer les potentiels techniques et économiques d'un effet levier entre politiques climatiques et développement;
3. étudier les types de compromis maximisant l'effet levier sur le développement et minimisant les capacités de blocage des points de contradiction;

4. cerner comment le régime climatique multilatéral post-2012 peut, en complémentarité avec d'autres dimensions de la régulation internationale ou des politiques de coopération, fournir les conditions institutionnelles permettant de supporter de tels compromis, la question centrale étant la capacité d'un cadre fait de règles s'appliquant en toute généralité, à intégrer la grande hétérogénéité des situations préexistantes tant du point de vue des tendances d'émissions que du point de vue des contraintes de développement.

V.2.4. Additionnalité Développementale du Mécanisme de Développement Propre et Aide Publique au Développement

Projet financé par le ministère de l'Environnement. Convention Médiás n°3/2001. GICC 2001. 98 p. Partenaires CIREC (coordinateur), ENDA Dakar (Sénégal), Indian Institute of Management (Inde), COPPE (Brésil) – 2001

L'étude menée consiste en trois évaluations méthodologiques de projets types MDP selon une progression allant vers un élargissement de l'échelle des projets. L'étude d'un projet MDP au Brésil visant à améliorer l'efficacité énergétique des réfrigérateurs montre les limites, pour le secteur de l'efficacité énergétique, d'une application abrupte des modalités du MDP, et les nécessités de l'adapter aux contraintes sociales et institutionnelles des PED par la prise en compte des barrières au développement des projets. C'est l'approche que nous adoptons dans la seconde étude, avec comme champ d'application la diffusion technologique du gaz naturel véhicule dans les transports urbains passagers à Delhi (voitures particulières et bus). L'étude donne lieu à la caractérisation d'un projet MDP pour lequel les crédits obtenus ne sont pas versés sous forme de rabais à l'achat des véhicules, mais permettent de lever les barrières et de financer à la fois un système de distribution du gaz et un système de contrôle des émissions, et rend incitative l'adoption de politiques et mesures domestiques (taxe sur le diesel). La troisième étude de cas évalue comment il serait possible que le MDP permette la mise en œuvre de projets plus proches encore des politiques de développement, telles que les politiques de développement urbain ou le financement d'infrastructures. Dans ce cas, du fait de la forte inertie des systèmes, s'en tenir à la mesure stricte des réductions à l'instant t conduit à sous-estimer la valeur de long terme des tonnes non émises entraînant des irréversibilités structurelles et modifiant les coûts de réduction futurs. Ceci dépasse largement la notion de projet du MDP, mais la vraie dimension qui apparaît ici est que l'on voit bien que les politiques climatiques ne sont plus séparables des politiques de développement. Une opportunité d'articulation des politiques climatiques avec les modes de financement du développement devrait viser la couverture des risques spécifiques au financement de ces projets, de manière à rétablir une homogénéité géographique et rendre plus attractive la venue d'investisseurs étrangers dans les pays ayant d'importants besoins en investissements.

VI. Responsabilités scientifiques, administratives et animation de la Recherche

Implication dans la vie scientifique du laboratoire

- Membre nommé au conseil de laboratoire depuis septembre 2015
- Responsable de l'axe Energie au sein du laboratoire GAEL, organisé en 3 axes (Innovation, Consommation et Energie) depuis septembre 2015
- Co-organisation des séminaires externes de GAEL depuis janvier 2015
- Organisation des séminaires internes de l'axe Energie en 2014-2015

Participation à des comités d'évaluation scientifique

- Poste MCF « Microéconomie appliquée », GAEL, 2016
- Poste MCF « Economie de l'énergie et de l'environnement », ENSE3 Grenoble et PACTE-EDDEN, 2012
- Poste MCF « Régulations économiques pour l'énergie et l'environnement », Université UPMF Grenoble, 2012
- Appels à projet PUCA (Plan Urbanisme Construction Architecture) du ministère de l'Équipement, 2011 ; ANR Changements Environnementaux Planétaires et Société, 2010.

Participation à des comités de pilotage

- Membre du conseil scientifique de la conférence Internationale *What's new in economics of innovation? Theory, empirics and public policies*, organisée par le GAEL, Grenoble, décembre 2016
- Co-porteur de la Chaire Géoressources et Transition Energétique avec Patrick Criqui (DR CNRS, GAEL) et Olivier Vidal (DR CNRS, ISTERRE)
- Comité d'organisation du projet d'Ecole Thématique « Autour du 2°C » prévue en 2017
- Colloque « Transition Energétique et Justice Sociale », septembre 2014, CERAS

Participation à des groupes d'expertises

- Groupe d'expertise GICN (Groupe Interdisciplinaire sur les Contributions Volontaires) piloté par Hervé Le Treut, en préparation de la COP21 auprès du MEDDE depuis avril 2015
- Collectif UGA-Climat de chercheurs de l'Université Grenoble-Alpes depuis novembre 2014
- Comité Scientifique et Technique du Fonds Français pour l'Environnement Mondial depuis janvier 2015

Partie 2 – Rapport de recherche

Mes recherches s'organisent selon deux axes complémentaires :

- **L'analyse macroéconomique des politiques climatiques prenant en compte imperfections de marché et situations de « second rang ».** Ces travaux se sont d'abord focalisés sur la participation au développement du modèle Imacim-R Monde¹, puis ils se sont réorientés à partir de 2007 vers le développement et l'exploitation du modèle Imacim-R France. Au-delà des publications dans des revues à comité de lecture et de la participation à un projet européen, ce développement m'a permis de contribuer à plusieurs [travaux d'expertise](#). Dans la description de mes travaux de recherche sur ce thème, je me focaliserai sur le cas de la France et du développement et de l'exploitation d'Imacim-R France.
- **L'intégration des pays en développement dans le nouveau régime climatique international, à travers l'insertion des politiques climatiques dans les politiques de développement.** Cet axe de recherche s'inscrit dans la continuité de ma thèse et débouche assez naturellement à la fois sur une vision enrichie des politiques de développement et sur l'analyse des négociations internationales sur le changement climatique.

I. Analyse macroéconomique des politiques climatiques intégrant des éléments de second rang

De nombreux modèles macroéconomiques ont été développés à l'échelle internationale pour évaluer les politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Ainsi, dans le dernier rapport du Groupe 3 du GIEC (2014), le chapitre VI *Transformation Pathways* synthétise et analyse les simulations de trente et un modèles prospectifs globaux, dits Modèles d'Évaluation Intégrée (*Integrated Assessment Models*)². Cependant, l'évaluation des coûts économiques au niveau national d'une politique bas carbone doit aussi prendre en compte de manière beaucoup plus fine les spécificités à la fois énergétiques, économiques et sociales des différents pays, spécificités qui ne peuvent être représentées avec le même niveau de détail dans les modèles mondiaux. Les différences importantes entre les mix énergétiques nationaux, ou entre les composantes du parc de bâtiments résidentiels par exemple, doivent conduire à adopter des politiques spécifiques à chaque pays. Le coût d'une politique climatique dépendra par ailleurs de la transmission des hausses de prix et de la flexibilité du marché

¹ Renaud CRASSOUS, Jean-Charles HOURCADE, Olivier SASSI, Vincent GITZ, Sandrine MATHY, Meriem HAMDICHERIF (2006) IMACLIM-R, A modeling framework for sustainable development issues, Working Paper CIREN, 40 p.

² IPCC Working Group III Contribution to AR5 (2014), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*, Cambridge University Press.

du travail ; de même, l'apparition d'un double dividende à la suite de l'instauration d'une taxe carbone dépendra de l'efficacité du système fiscal (Goulder, 1995). L'évaluation de ces politiques nécessite donc de disposer de modèles intégrant correctement les spécificités nationales.

La construction du modèle Imaclim-R France à partir du modèle Imaclim-R Monde a été précisément menée pour développer un outil de modélisation macroéconomique hybride – Imaclim-R France – dans le but d'évaluer les trajectoires de décarbonation et de transition énergétique tenant compte des spécificités de la France, en termes de représentation du système énergétique ou économique.

Considérant le changement climatique comme un problème dans l'économie du long terme, la plupart des modèles mobilisés pour son analyse économique reposent sur le paradigme néoclassique d'une croissance de long terme stabilisée, ignorant les déséquilibres de court terme et les mécanismes de second rang. Les outils mobilisés sont fondés sur les concepts d'optimalité et d'équilibre avec une allocation optimale des ressources associée à un plein emploi des facteurs de production le long d'un chemin de croissance stabilisée. La boîte à outils néoclassique repose ainsi sur des hypothèses d'agents représentatifs ayant des comportements d'optimisation, une information et des anticipations parfaites, de marchés parfaits et de mobilité instantanée des facteurs³. Ces concepts d'optimalité conduisent les modèles à produire nécessairement (i) des coûts nets de l'atténuation, impliquant systématiquement un compromis entre activité économique et réduction des émissions, (ii) mais aussi des coûts limités par les fortes flexibilités et capacités d'adaptation de l'économie supposées. Ceci occulte les rigidités du monde réel, et notamment le rôle des contraintes du court terme et des points de blocage dans la transition vers des économies bas carbone.

C'est pourquoi l'architecture de modélisation Imaclim-R s'attache à permettre l'intégration d'éléments de second rang et la représentation de mécanismes de court terme dans un cadre de long terme. Cette structure de modélisation s'inspire de l'appel formulé par R. Solow à rechercher « *a hybrid model: at short term 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* » (Solow, 2000). Les particularités du modèle reposent sur (i) une représentation de l'inertie du capital productif (technologies *putty-clay*) et des équipements des ménages, mais aussi des comportements des différents acteurs et (ii) l'intégration d'un certain nombre d'éléments de second rang dans le cœur macroéconomique du modèle, à savoir la rigidité des marchés du travail, les anticipations imparfaites des acteurs pour leurs choix d'investissements et la possibilité d'utilisation incomplète des facteurs de

³ Ils ignorent également la dimension schumpétérienne du changement technique et des combinaisons productives à long terme.

production. Des déséquilibres endogènes engendrés par l'inertie dans l'adaptation à de nouvelles conditions économiques sont représentés par des rigidités introduites par une représentation des générations de capital disponible à chaque date avec des technologies *putty-clay*. Sur le court terme, la flexibilité principale réside dans le taux d'utilisation du capital productif, ce qui peut induire une sous- ou sur-utilisation des facteurs de production, du chômage et une rentabilité du capital inégale entre secteurs. Dans cette perspective, Imaclim-R France a été conçu comme un modèle hybride d'équilibre général représentant l'économie française désagrégée en 13 secteurs⁴ et selon une hypothèse d'économie ouverte.

1.1. Description d'Imaclim-R France

L'architecture globale du modèle Imaclim-R monde a été importée pour construire le modèle Imaclim-R France. Mes contributions de modélisation pour le développement et l'utilisation du modèle Imaclim-R France ont porté principalement sur la calibration du modèle en général à la France, un travail d'endogénéisation de la balance commerciale, la construction de modules sectoriels (secteur électrique et véhicules individuels notamment), la modélisation de certaines options (coûts, potentiels techniques) de décarbonation (biocarburants, biogaz, véhicules GNV...) et le travail de modélisation des différentes politiques climatiques sectorielles et climatiques (taxe carbone et modes de recyclage des revenus de la taxe) dans le cadre de différents [travaux d'expertises](#), [projets de recherche](#) et des exercices de scénarisation décrits notamment plus bas.

Imaclim-R France est un modèle de prospective énergie/économie de la famille des modèles Imaclim développés depuis les années 1990 au CIRED. C'est un modèle hybride représentant l'évolution annuelle simultanée de l'économie et des systèmes techniques associés pour des horizons allant jusqu'au long terme, à 2050,⁵. Pour dépasser les limites des modèles d'équilibre général intertemporels standards, qui décrivent une trajectoire économique en marchés parfaits fondée sur une allocation optimale des investissements, Imaclim-R représente à la fois le moteur de la croissance à long terme (croissance démographique et croissance de la productivité du travail) et les frictions pouvant survenir à court terme (anticipations imparfaites, utilisation incomplète des facteurs de production, inerties à différents niveaux : stocks d'équipements, techniques, préférences, flux commerciaux ou flux de capitaux) au travers d'une architecture récursive. La croissance économique est ainsi décrite comme une succession d'équilibres walrasiens statiques (production, consommation,

⁴ Energie (pétrole brut, pétrole raffiné, gaz, charbon et électricité), transport (transport routier de marchandises, transport par voie d'eau, transport aérien, transport de passagers et transport public routier de personnes), construction, industries intensives en énergie, agriculture et services.

⁵ La version utilisée dans ce rapport est calibrée sur l'année 2004 et projette l'économie française jusqu'en 2050.

échanges internationaux) sous un ensemble de contraintes agrégées depuis des modules sectoriels ; ces sous-modèles représentent de manière détaillée l'évolution des techniques et des stocks de facteurs de production (capital, travail, ressources naturelles) tel qu'illustré dans la Figure 1.

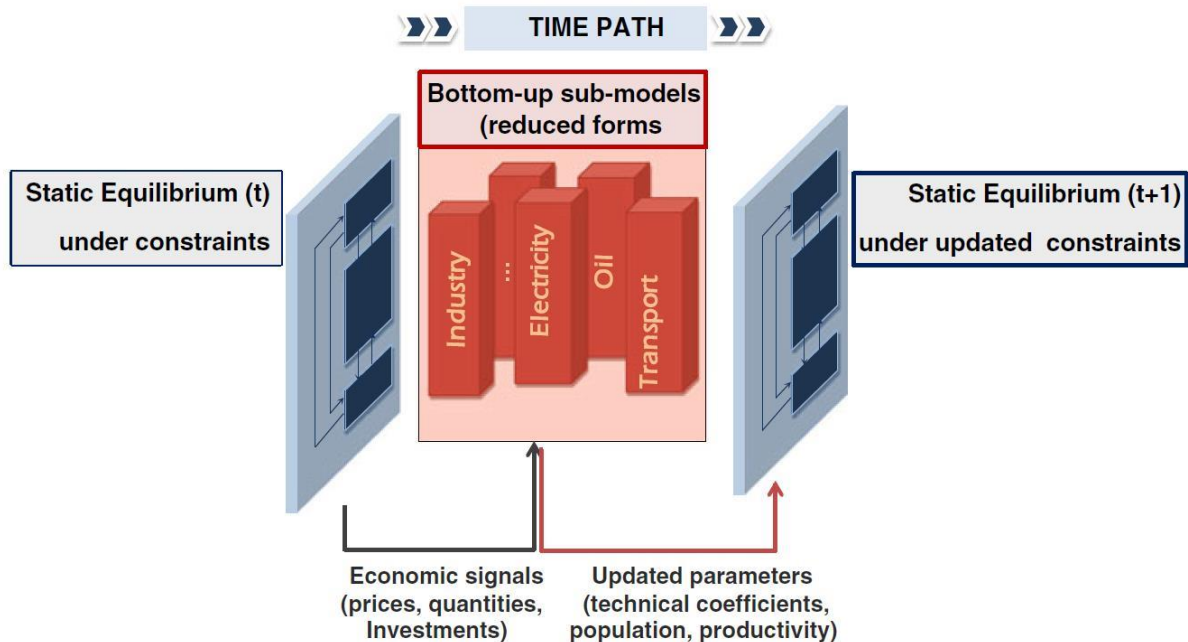


FIGURE 1 : LA STRUCTURE RECURSIVE ET MODULAIRE D'IMACLIM-R FRANCE

1.1.1. Equilibre statique

Chaque équilibre statique ne décrit pas un optimum collectif de production compte tenu des techniques disponibles. L'équilibre est en effet contraint à une situation sous-optimale par l'inertie des équipements et l'allocation imparfaite des investissements entre secteurs, entraînant par exemple des surcapacités de production dans certains secteurs et des sous-capacités dans d'autres ; ainsi apparaissent les tensions sur les prix et les quantités, l'absence de plein emploi en raison des rigidités du marché du travail, les distorsions créées par les taxes préexistantes ou encore la prise en compte des routines de comportement des agents économiques.

L'économie est désagrégée en 13 secteurs : énergie (pétrole brut, pétrole raffiné, gaz, charbon et électricité), transport (transport routier de marchandises, transport par voie d'eau, transport aérien, transport collectif de personnes), construction, industries intensives en énergie, agriculture et autres activités (en particulier services). Le calibrage de ces secteurs repose sur une matrice hybride réconciliant comptabilité nationale et bilans énergétiques, ce qui permet une représentation précise des prix et des quantités d'énergie consommées par les agents économiques, et ce qui légitime l'articulation des équilibres walrasiens successifs aux modules technico-économiques. Dans ces modules, des variables physiques explicites (*cf. infra*) ouvrent la voie à l'intégration rigoureuse de

données sectorielles relatives à l'impact des incitations économiques sur la demande finale et les systèmes techniques.

L'équilibre statique détermine les prix relatifs, les salaires, les taux d'utilisation des capacités de production, les quantités produites et consommées par les ménages et les administrations et aussi comme consommations intermédiaires d'autres productions, les taux de profit et l'épargne. L'équilibre statique résulte des contraintes de court terme pour l'offre et la demande sur l'ensemble des marchés, y compris les marchés énergétiques.

Les ménages maximisent leur bien-être et ils opèrent leurs choix de consommation en fonction d'une contrainte budgétaire et de temps. La première est la somme des salaires, des rendements du capital, et des transferts, la seconde traduit le temps passé dans les transports.

Les firmes adaptent leur production sur le court terme en fonction de coefficients entrée-sortie (reflétant le contenu moyen des technologies du stock de capital) et de taux de rendement décroissants lorsque le taux d'utilisation des capacités approche de la saturation. Les producteurs sont ainsi soumis à des contraintes de court terme qui font qu'ils ne peuvent produire plus que ce que le stock de capital installé et accumulé au fil du temps ne permet. Dans ce contexte, la seule marge de liberté des producteurs est d'ajuster le taux d'utilisation des capacités en fonction des prix relatifs des inputs et des outputs, en tenant compte de l'augmentation des coûts de production lorsque le taux d'utilisation des capacités approche de la saturation. Cette représentation est différente des spécifications de production habituelles. Enfin, les producteurs déterminent leurs prix en fonction d'un taux de marge qui permet de représenter la concurrence imparfaite.

Les producteurs opèrent également avec une quantité fixe de travail par unité produite. Entre deux années, la quantité de travail évolue selon les secteurs en fonction de trends exogènes de croissance de la productivité du travail comme dans un modèle néoclassique (Solow, 1956). Là aussi, le facteur de production travail peut être sous-utilisé. Trois caractéristiques du modèle expliquent ce phénomène : i) la rigidité des salaires réels représentée par une courbe salaire-chômage ; ii) dans l'équilibre statique, les coefficients fixes des facteurs de production empêchent toute substitution entre les facteurs de production ; iii) le capital installé n'est pas mobile d'un secteur à l'autre, ce qui crée des rigidités dans la réallocation des productions sectorielles lorsque les prix relatifs changent. La courbe salaire-chômage agrégée établit un lien entre le salaire réel et le niveau de chômage (Blanchflower et Oswald, 1995). Cette courbe permet de représenter la menace pour les salariés de devoir accepter des salaires plus bas quand le chômage augmente.

La dynamique de l'économie est assurée par une description endogène de l'accumulation du capital et du progrès technique. L'accumulation de capital est donnée par les investissements des entreprises, l'épargne des ménages exogène et les flux de capitaux. Le taux d'épargne des ménages est exogène. L'allocation des investissements entre secteurs tient compte des attentes en termes de rentabilité des secteurs. Les décisions d'investissements sont faites selon l'hypothèse d'anticipations myopes. Celles-ci proviennent des incertitudes quant à l'évolution des prix relatifs (notamment incertitudes sur l'évolution du prix des énergies), des niveaux de demande finale et de rentabilité des investissements, d'autres prix non énergétiques (foncier et immobilier) et d'autres déterminants non économiques des politiques publiques, en terme notamment d'aménagement du territoire et de transports. A une date donnée, les agents économiques disposent d'une information limitée sur le futur et forment donc leurs prévisions sur la base des tendances passées et présentes. Sous de telles conditions d'anticipations myopes, le capital installé résultant des décisions d'investissement passées peut ne pas être adapté aux conditions économiques futures. Pour autant, il ne peut pas être renouvelé du jour au lendemain du fait des inerties et il agit alors comme une contrainte sur l'ajustement aux variations des conditions économiques (niveaux d'activité et prix). Entre deux équilibres statiques, les choix des technologies sont flexibles mais ils ne modifient qu'à la marge les coefficients Input-Output et la productivité du travail. Cette représentation *putty-clay* est déterminante pour représenter l'inertie des systèmes techniques.

1.1.2. La demande d'énergie

a. Le secteur résidentiel

Dans le module résidentiel (Giraudet *et al.*, 2012), le parc de logements est ventilé par catégorie de vecteur énergétique (électricité, gaz, fioul, bois, charbon), par classe énergétique au sens de l'étiquette énergie pour les bâtiments (classes A à G), et par type de propriétaire et de logement (cinq catégories : propriétaires occupants ou bailleurs de maisons individuelles, propriétaires occupants ou bailleurs de logements collectifs et logements sociaux). Chaque année, l'effet conjugué de la croissance démographique, de l'augmentation moyenne de la surface par habitant et des démolitions justifie la demande de nouvelles mises en chantier. Les bâtiments construits répondent à l'évolution prévue des réglementations thermiques (bâtiment basse consommation et bâtiment à énergie positive).

En outre, l'efficacité thermique des bâtiments existants évolue chaque année par des actions implicites sur l'enveloppe (isolation, double vitrage) et sur les systèmes de chauffage. Ces actions dépendent de la rentabilité relative des options possibles de rénovation (changement d'étiquette de performance ou changement de combustible) spécifiques à chaque type de logement caractérisé par son étiquette énergie et son combustible de départ, et la catégorie à laquelle il appartient. Le calcul de la valeur

actualisée nette (VAN) prend en compte le coût d'investissement incluant les incitations ou aides éventuelles (étiquette de départ-étiquette visée), les économies d'énergie propres à chaque option possible (changement d'étiquette et changement de combustible), actualisées sur leur durée de vie. Des taux d'actualisation spécifiques à chaque type de propriétaire (propriétaire occupant ou bailleur de maisons individuelles, de logements collectifs ou sociaux) permettent de refléter le « dilemme propriétaire-locataire », ainsi que par exemple la difficulté de mettre en œuvre une rénovation des logements dans des copropriétés. La nature imparfaite de l'information se traduit par la prise en compte de « coûts intangibles » qui s'ajoutent aux coûts économiques lorsqu'un propriétaire prend la décision de rénover un logement. Ces coûts décroissent dans le temps du fait de l'accumulation des connaissances, liée à l'accélération de la diffusion de l'information ou à « l'effet de voisinage ».

La consommation d'électricité spécifique des ménages est fonction d'une élasticité-prix (-0,5) et d'une élasticité-revenu supérieure à 1, à l'année de calibrage, mais qui décroît à l'approche d'un plafond de consommation d'électricité spécifique par habitant.

b. Le transport de passagers

La mobilité des passagers et le partage modal résultent de la maximisation d'une fonction d'utilité tenant compte de la mobilité sous contrainte de revenu et de budget-temps pour capturer les liens entre demande finale, disponibilité en infrastructures et équipements (Waisman *et al.*, 2012). Les choix modaux sont le véhicule particulier, les transports collectifs terrestres et aériens, ou les modes doux (marche à pied, vélo...). La construction de nouvelles infrastructures dans un de ces modes de transport permet explicitement de diminuer les phénomènes de congestion et d'augmenter la vitesse de déplacement qui y est attachée et prise en compte dans le budget-temps. 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 cinq types de technologies : conventionnels ou hybrides (efficaces ou standard) et véhicules électriques. Les spécifications propres à chacune de ces technologies évoluent dans le temps en fonction du progrès technique. À chaque date, la composition technologique de la nouvelle génération de véhicules résulte du choix des agents parmi les technologies explicites, en comparant, pour chaque technologie disponible, le coût moyen actualisé d'un véhicule-kilomètre.

c. Le transport de marchandises

La demande de fret résulte de l'agrégation de la demande de transport de marchandises de chaque secteur productif. Le volume de transport de fret est directement lié aux modes de consommation et à l'évolution de la structure de l'économie. En revanche, il est peu sensible aux prix de l'énergie, les choix modaux étant davantage dictés par les possibilités logistiques et l'organisation de la chaîne

d'approvisionnement. De telles options peuvent être représentées de manière exogène en jouant par exemple sur les consommations intermédiaires en transport de la production, mais par défaut celles-ci sont considérées constantes.

L'évolution de l'efficacité énergétique des transports maritimes ou aériens est exogène, celle des transports terrestres (routier et ferroviaire) dépend d'une élasticité-prix du carburant. L'évolution de la consommation d'énergie (mix énergétique et niveau de consommation) du transport terrestre résulte simultanément des mutations technologiques, des reports modaux (notamment celui du fret routier sur le rail guidé par les dotations en infrastructures et les prix relatifs). Les gains d'efficacité énergétique du transport routier sont limités à 30 % entre 2004 et 2050.

d. Les industries grandes consommatrices d'énergie, le tertiaire et le secteur agricole

L'inertie inhérente aux capacités installées se reflète au travers d'une représentation en générations de capital (les capacités installées à une certaine date relèvent d'une technologie donnée et ont une durée de vie incompressible). La consommation d'énergie de chacun de ces secteurs est donc égale à la moyenne pondérée des consommations de toutes les générations de capital installé. L'évolution de la consommation énergétique traduit non seulement l'amélioration des technologies, mais également l'évolution de la répartition des différents sous-secteurs agrégés (à titre d'exemple, réduction de la part des services intensifs en énergie au profit d'autres services). Deux mécanismes sont pris en compte : (i) le progrès technique autonome suivant une tendance historique, et (ii) le progrès technique induit par l'évolution des prix relatifs de l'énergie contenant éventuellement une taxe carbone. Enfin, l'évolution des prix relatifs des énergies induit des substitutions entre vecteurs.

1.1.3. Les vecteurs énergétiques

a. Le vecteur électricité

Les technologies de production d'électricité représentées sont : le thermique à flamme (gaz, charbon avec ou sans capture et stockage du carbone, fioul), le nucléaire existant et de 3^e génération, l'éolien off- et on-shore, le photovoltaïque, l'hydroélectricité (incluant les barrages, le fil de l'eau et les stations de transfert d'énergie par pompage). Chacune est caractérisée par des coûts d'investissement, des coûts fixes, des rendements énergétiques, des facteurs d'indisponibilité, des durées de construction et des durées de vie. Le prix de l'électricité est la somme du coût complet de production, des coûts de réseaux et des taxes.

La demande d'électricité est l'agrégation des demandes de chacun des secteurs et des ménages. La demande annuelle est exprimée sous la forme d'une monotone de charge. Des mesures de gestion de

la demande peuvent contribuer à lisser la monotone de charge et limiter le niveau de la pointe. Les technologies de production sont sollicitées pour répondre à cette demande selon leur ordre de mérite, en tenant compte des productions fatales (photovoltaïque, éolien et fil de l'eau). L'évolution des capacités installées dépend de la rentabilité des technologies de production en fonction d'anticipations imparfaites qui prolongent les tendances d'évolution de la demande et de la forme de la monotone de charge. L'inertie des capacités de production est représentée notamment au travers de la durée de construction des capacités et de leur durée de vie. Des hypothèses exogènes doivent être faites sur la prolongation éventuelle de tout ou partie des centrales nucléaires existantes. Le module électrique fournit ainsi le coût de production de l'électricité et l'investissement en valeur du secteur électrique à l'équilibre walrasien qui détermine quant à lui la demande d'électricité.

b. Le vecteur gaz

Le gaz naturel représente environ 15 % du bilan énergétique français. Sa part dans la consommation énergétique est susceptible de s'accroître encore à l'avenir, en raison notamment du développement de nouveaux usages tels que l'utilisation du gaz naturel pour véhicules, la production combinée de chaleur et électricité (cogénération)... Le contenu carbone du gaz dans le modèle peut diminuer selon le niveau de développement du biogaz, en fonction de l'évolution du coût de production du biogaz selon des taux d'apprentissage et des potentiels techniques.

c. Le vecteur combustibles liquides

Le transport et le résidentiel-tertiaire restent les deux secteurs les plus consommateurs. Environ 50 % de la facture pétrolière de la France est attribuée au seul secteur des transports. Dans le modèle, les combustibles liquides sont composés de produits pétroliers, de biocarburants et de charbon liquéfié selon les coûts relatifs de production et les potentiels techniques.

1.2. Spécificités d'ImacliM-R France par rapport aux autres modèles macroéconomiques utilisés pour l'évaluation de la transition énergétique [33]

Dans cette section, nous décrivons les spécificités d'ImacliM-R France et de ses résultats par rapport aux autres modèles macroéconomiques utilisés pour l'évaluation de la transition énergétique en France. Pour cela nous nous référons à un exercice de comparaison de modèles initié par France Stratégie fin 2014. Il ne s'agissait pas de simuler des politiques économiques susceptibles d'être mises en place, mais d'observer les impacts sur l'économie française de chocs « simples », en s'intéressant à deux catégories de résultats : les effets sur l'équilibre macroéconomique (PIB, emploi, salaires, prix) et ceux sur les grandeurs énergétiques (consommation d'énergie, intensité énergétique, émissions de CO₂). Le but était d'isoler précisément ce qui, dans les résultats des modèles, s'explique par les

hypothèses spécifiques à l'un ou l'autre modèle et/ou par le niveau de désagrégation sectorielle retenu. Les chocs simulés ont été les suivants :

- Prix fossiles +10 % : les prix à l'importation des énergies fossiles sont augmentés de 10 % par rapport à leur valeur en référence calibrée sur le scénario NPS (New Policies Scenario) de l'AIE.
- Prix fossiles +100 % : hausse de 100 % au lieu de 10 %.
- Taxe carbone à un niveau où elle dégagerait 1 point de PIB de recettes dans le scénario de référence.
- Taxe sur les volumes d'électricité consommés à un niveau où elle dégagerait 1 point de PIB de recettes dans le scénario de référence.
- Baisse des cotisations sociales pour un montant agrégé *ex ante* d'1 point de PIB en référence.

Parmi les modèles disponibles utilisés dans cet exercice, trois sont des modèles macroéconométriques, le dernier étant Imacsim-R France. Un court descriptif de ces modèles est donné dans l'Encadré 1. À l'exception du modèle Mésange, les modèles macroéconomiques utilisés pour l'évaluation de la transition énergétique proposent des désagrégations sectorielles fines et incorporent des approches microéconomiques qui diffèrent selon le type de secteur considéré (producteur d'énergie, gros utilisateur d'énergie comme les transports...).

ENCADRE 1 : LES MODELES MACROECONOMETRIQUES DE L'EXERCICE DE COMPARAISON DES MODELES

Le modèle Mésange⁶, développé par la direction générale du Trésor et l'Insee, se caractérise par une dynamique keynésienne à court terme et un équilibre de long terme déterminé par des facteurs d'offre. Ce modèle à trois secteurs n'isole pas formellement la branche énergie, mais distingue les consommations d'énergie des ménages et des entreprises ainsi que les importations énergétiques. Ainsi, les équations de consommation et d'importation prennent explicitement en compte les prix de l'énergie relativement aux autres prix. Un modèle sectoriel est utilisé en parallèle pour intégrer les possibilités de substitution entre énergies.

Le modèle Némésis⁷ développé par ERASME-SEURECO est fondé sur une structure en trente secteurs. Chaque secteur productif est modélisé par une fonction de production de type CES (*Constant elasticity of substitution*) qui décrit les possibilités de substitution entre facteurs de production au sens large (consommation intermédiaire, travail qualifié, travail peu qualifié, capital, énergie) avec un « emboîtement » des niveaux de substitution entre facteurs. Némésis contient par ailleurs une modélisation spécifique du secteur de la production énergétique qui décrit des possibilités de substitution, entre d'une part l'électricité et d'autre part cinq autres sources d'énergie primaire (le pétrole, le gaz, le charbon, les énergies renouvelables hors électricité et les autres énergies). La demande d'énergie des ménages résulte aussi de divers arbitrages qui dépendent en partie du prix de l'énergie. Toutes choses égales par ailleurs, une augmentation du prix de l'énergie réduira la demande de voitures et d'essence au profit des transports en commun.

Le modèle ThreeME⁸ est développé conjointement par l'OFCE⁹ et l'ADEME. Il comprend vingt-quatre secteurs de production. Le secteur de l'énergie est lui-même divisé en dix-sept sous-secteurs, celui des transports en cinq sous-secteurs. Les fonctions de production sont également de type CES avec substitution énergie-capital ainsi qu'entre énergies. La demande d'énergie des ménages est modélisée par des équations spécifiques qui tiennent compte d'un arbitrage entre différents types de logements et de voitures selon leur efficacité énergétique. Dans ce cadre, une augmentation des prix de l'énergie incite les ménages à investir dans des logements et des voitures plus économes en énergie, ce qui se répercute *in fine* sur leur consommation d'énergie.

⁶ Modèle Économétrique de Simulation et d'ANalyse Générale de l'Économie.

⁷ New Econometric Model of Evaluation by Sectoral Interdependency and Supply.

⁸ Modèle macroéconomique multisectoriel d'évaluation des politiques énergétiques et environnementales.

⁹ Observatoire français des conjonctures économiques.

1.2.1. L'effet sur l'équilibre macroéconomique

a. Un relatif consensus quant à l'effet de la hausse du prix de l'énergie sur l'activité

L'impact macroéconomique de chocs touchant le prix de l'énergie et les taxes sur l'utilisation de l'énergie est similaire, quel que soit le modèle de type macroéconométrique (Mésange, Némésis, ThreeME) avec lequel il est mesuré, du moins pour l'effet sur l'activité économique (Tableau 1).

Un modèle d'équilibre général calculable « hybride » et en marchés imparfaits comme Imaclim-R France conduit à des dynamiques différentes : si à moyen terme (dix ans), les résultats se rapprochent de ceux issus des autres modèles, les effets à court et à long termes sont différents. La modélisation technique explicite induit des rigidités à court terme plus fortes que celles décrites par les modèles macroéconométriques, et par suite un effet plus négatif à court terme sur l'économie. À long terme, en revanche, dans le modèle Imaclim-R une hausse du prix de l'énergie aide à lever certains blocages, ce qui allège *in fine* le poids sur l'économie.

L'impact macroéconomique d'une hausse du prix de l'énergie est principalement déterminé par les possibilités de substitution à l'énergie d'autres facteurs de production et d'autres biens de consommation. De ce point de vue, si les modèles comparés ici se distinguent bien par des possibilités de substitution plus ou moins élevées, ces dernières restent dans tous les cas relativement limitées. Dans l'exercice présenté, aucun des modèles macroéconométriques français n'envisage le cas où une hausse très importante du prix de l'énergie fossile déclencherait de très larges possibilités de substitution aux consommations d'énergie et/ou un changement technologique radical qui favoriserait des technologies économes en énergie au-delà de ce qui est usuellement retenu dans de tels modèles. C'est conforme à ce qu'enseignent les travaux empiriques disponibles sur les valeurs des élasticités de substitution entre l'énergie et les autres facteurs (Hassler *et al.*, 2012). Ces possibilités apparaissent toutefois plus étalées dans le temps avec le modèle Imaclim-R France, ce qui explique que les chocs simulés aient des effets récessifs moindres à long terme.

Dans tous les modèles économétriques, les effets des hausses permanentes de prix et/ou de taxes sur l'énergie apparaissent rapidement et ne s'atténuent pas dans le temps. En l'absence de mesures redistributives, le multiplicateur de long terme est proche de 1 : une hausse des prélèvements d'un montant de 1 % du PIB se traduit, avant recyclage des recettes de la taxe, par une activité inférieure de 1 % en moyenne. Cela suggère que, dans le cas où il s'agit d'une taxe, le recyclage des recettes de la taxe dans l'économie ne parviendrait à contrebalancer les effets récessifs qu'à condition, soit qu'il réduise les coûts unitaires de production, soit qu'il augmente l'investissement productif (plutôt que la

consommation ou l'investissement peu productif). En effet, dans les modèles macroéconomiques, l'impact d'un soutien, même permanent, à la demande (consommation ou investissement peu productif) s'estompe progressivement du fait des effets d'éviction et ne parvient donc pas à contrebalancer le choc d'offre permanent¹⁰. Dans le modèle Imaclim-R, la dynamique est radicalement différente : les chocs de prix envisagés sont beaucoup plus coûteux pour l'économie à court terme, mais ils sont mieux absorbés à long terme. En termes de gestion macroéconomique, les politiques d'accompagnement conjoncturel apparaissent alors davantage nécessaires.

TABLEAU 1 : IMPACTS DES CHOCS SIMULES SUR L'EQUILIBRE MACROECONOMIQUE DE LA FRANCE

	PIB*				Emplois salariés (milliers)				Salaires réels*				Prix à la consommation*			
	3 ans	5 ans	10 ans	LT**	3 ans	5 ans	10 ans	LT**	3 ans	5 ans	10 ans	LT**	3 ans	5 ans	10 ans	LT**
Hausse permanente de 10% des prix des énergies fossiles																
Mésange	-0,2	-0,2	-0,3		-30	-60	-50						0,6	0,7	0,6	
ThreeME WS	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-30	-50	-60	-60	-0,3	-0,3	-0,4	-0,3	0,7	0,9	1,0	1,1
ThreeME Ph	-0,3	-0,3	-0,3	-0,2	-30	-50	-70	-40	-0,1	-0,1	-0,2	-0,7	0,8	1,1	1,4	0,5
Némésis	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-30	-30	-30	-30	-0,3	-0,2	-0,2	-0,2	0,5	0,5	0,5	0,4
Imaclim R	-0,7	-0,6	-0,4	0,0	-90	-90	-80	-30	-0,6	-0,5	-0,5	-0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Hausse permanente de 100% des prix des énergies fossiles																
ThreeME WS	-2,7	-2,7	-2,5	-2,4	-290	-430	-490	-510	-2,3	-2,8	-3,0	-2,8	6,3	7,8	9,2	9,2
ThreeME Ph	-2,7	-2,7	-2,7	-2,2	-310	-480	-600	-330	-1,2	-1,1	-1,4	-5,3	6,9	9,4	12,5	4,7
Némésis	-2,4	-2,5	-2,4	-2,3	-250	-300	-300	-290	-2,3	-2,1	-2,0	-1,9	4,3	4,8	4,5	4,0
Imaclim R	-4,8	-4,3	-3,2	-0,4	-650	-600	-630	-260	-3,9	-3,8	-4,5	-4,6	4,8	4,7	4,6	4,7
Hausse permanente de la taxe carbone (équivalente à 1% du PIB en valeur ex ante)																
Mésange	-0,6	-0,7	-0,7	-0,7	-150	-140	-110	-110	-0,8	-1,1	-1,4	-1,7	1,8	1,8	1,9	1,4
ThreeME WS	-0,8	-0,8	-0,7	-0,9	-90	-130	-150	-200	-0,7	-0,9	-1,0	-1,1	1,6	1,9	2,2	2,6
ThreeME Ph	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-100	-150	-190	-150	-0,3	-0,3	-0,5	-1,9	1,8	2,4	3,1	1,4
Némésis	-1,2	-1,2	-1,3	-1,3	-130	-150	-160	-170	-1,2	-1,1	-1,2	-1,3	3,1	3,4	3,4	3,3
Imaclim R	-2,0	-1,8	-1,2	-0,1	-240	-240	-220	-80	-0,9	-0,9	-0,9	-0,6	1,3	1,3	1,3	1,3
Hausse permanente de la taxe sur l'électricité (équivalente à 1% du PIB en valeur ex ante)																
ThreeME WS	-0,9	-0,8	-0,7	-0,9	-110	-140	-140	-190	-0,7	-0,9	-0,9	-1,1	1,6	1,8	2,0	2,5
ThreeME Ph	-0,9	-0,8	-0,8	-0,8	-120	-160	-180	-140	-0,3	-0,3	-0,5	-1,8	1,8	2,3	2,9	1,4
Némésis	-1,4	-1,5	-1,4	-1,4	-80	-110	-110	-110	-1,6	-1,5	-1,4	-1,3	3,3	4,0	4,2	4,1
Imaclim R	-1,3	-1,2	-1,1	-0,3	-210	-200	-180	-60	-1,0	-1,0	-1,1	-0,8	0,8	0,8	0,8	0,6
Baisse permanente des cotisations employeurs (équivalente à 1% du PIB en valeur ex ante)																
Mésange	0,9	1,1	1,2	1,4	270	270	260	280	1,2	1,5	2,0	2,4	-1,3	-1,6	-1,9	-2,0
ThreeME WS	1,0	1,1	1,1	1,0	170	230	260	260	1,1	1,4	1,6	1,5	-1,2	-1,5	-1,5	-1,0
ThreeME Ph	1,0	1,2	1,2	0,7	190	270	340	130	0,4	0,5	0,8	2,9	-1,7	-2,4	-3,2	1,7
Imaclim R	1,1	1,2	1,2	0,8	220	220	210	70	0,8	0,9	0,9	0,9	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8

* Écart au compte central, en %.

** À 35 ans pour ThreeME et Imaclim-R ; 15 ans pour Némésis.

Versions de ThreeME : WS = avec équation des salaires Wage-Setting ; Ph = avec courbe de Phillips.

Source : simulation des auteurs.

¹⁰ Le recyclage des recettes de la taxe dans l'économie peut prendre des formes de soutien à la baisse des coûts de production et à l'essor de l'investissement productif : allègements de cotisations sociales (patronales ou salariales), allègements d'impôts sur les facteurs de production tels l'impôt sur les sociétés ou l'impôt sur les revenus du travail ou du capital. Un recyclage à travers le soutien à l'efficacité énergétique ou à la recherche permettrait également d'accompagner efficacement la mise en œuvre de la taxe carbone. De même, le recyclage pourrait limiter, voire contrebalancer, l'aggravation des inégalités qui résulteraient des politiques climatiques.

b. Des divergences dans l'effet sur l'emploi dues à la modélisation du marché du travail

Si l'ampleur des effets sur l'activité des chocs étudiés est similaire d'un modèle à l'autre, il n'en va pas de même pour les effets sur l'emploi et les salaires. Deux cas se distinguent. Dans le cas où la dynamique des salaires dépend du niveau de chômage (« courbe de Philips »), l'effet dépressif sur l'économie d'une hausse du prix de l'énergie ou d'une taxe sur l'énergie fossile se traduit à moyen et long terme par une modération salariale qui limite les effets négatifs sur l'emploi. Dans le cas où le modèle théorique sous-jacent à la formation des prix et des salaires est un modèle *Wage Setting - Price Setting (WS – PS)*¹¹, le chômage d'équilibre augmente du fait de la hausse de la taxe sur l'énergie, ce qui se traduit par des salaires plus élevés mais une progression du chômage. Le choix de modélisation adopté pour la formation des salaires conduit à des résultats relativement différents quant à l'impact d'une taxation de l'énergie sur l'emploi, les salaires et le chômage. Toutes choses égales par ailleurs, un choc sur le prix de l'énergie se traduit par une moindre hausse du chômage lorsque le marché du travail est flexible et que la main-d'œuvre dispose des compétences nécessaires aux emplois créés par la transition énergétique (ce dernier point étant mal pris en compte dans les modèles qui font l'hypothèse d'une forte mobilité du travail entre secteurs). Symétriquement, toutefois, les effets expansifs sur l'emploi d'une baisse d'impôts ou de charges seront plus importants avec une *WS – PS* qu'avec une courbe de Phillips, comme l'attestent les simulations réalisées avec une courbe de Phillips ou *Wage Setting*, des effets d'une baisse permanente des cotisations sociales (Tableau 1).

Les simulations montrent que le multiplicateur (positif) d'une baisse des charges sociales peut être supérieur, en valeur absolue, au multiplicateur (négatif) d'une hausse de la taxe carbone. Auquel cas, le recyclage des recettes carbone sous forme de diminution des cotisations sociales favorise l'émergence d'un double dividende, écologique et économique.

¹¹ *Wage-setting, price-setting.*

I.2.2. Impact sur les émissions de CO₂ et les consommations d'énergie

a. Une convergence des modèles quant à l'impact d'une hausse des prix de l'énergie sur les émissions de CO₂

Les simulations des différents modèles¹² montrent qu'une taxe carbone équivalent à un montant de 1 % du PIB *ex ante*¹³ se traduit par une réduction des émissions de CO₂ de près de 10 % à un horizon de cinq ans et de 15 % en moyenne à long terme. Si la taxe porte sur la consommation d'électricité, toujours pour un montant de 1 % du PIB *ex ante*, les réductions des émissions de CO₂ sont moindres et différentes d'un modèle à l'autre : à long terme la baisse est de 5 % dans ThreeME, 7 % dans Imaclim-R France et négligeable dans Némésis. Les différences entre modèles s'expliquent par les hypothèses retenues dans le mix électrique du scénario tendanciel, qui peut varier selon le modèle.

TABEAU 2 : IMPACTS DES CHOCS SIMULES SUR LES INDICATEURS ENERGIE/CLIMAT DE LA FRANCE

	Émissions de CO ₂ *				Consom. énergie finale*				Intensité énergétique*			
	3 ans	5 ans	10 ans	LT**	3 ans	5 ans	10 ans	LT**	3 ans	5 ans	10 ans	LT**
Hausse permanente de 10% des prix des énergies fossiles												
ThreeME WS	-2,0	-2,4	-2,6	-3,3	-1,6	-2,0	-2,1	-2,3	-1,3	-1,6	-1,8	-2,0
ThreeME Ph	-2,0	-2,4	-2,8	-3,1	-1,6	-1,9	-2,1	-2,3	-1,3	-1,6	-1,8	-2,0
Némésis	-1,8	-1,7	-1,8	-1,8	-0,8	-0,7	-0,7	-0,7	-0,8	-0,7	-0,7	-0,4
Imaclim R	-2,1	-2,5	-3,1	-4,2	-1,5	-1,8	-2,4	-2,8	-0,8	-1,2	-2,0	-2,7
Hausse permanente de 100% des prix des énergies fossiles												
ThreeME WS	-12,8	-15,1	-16,0	-17,3	-12,3	-14,7	-15,5	-16,5	-9,9	-12,3	-13,1	-14,6
ThreeME Ph sE	-12,5	-14,8	-16,0	-17,3	-12,1	-14,5	-15,5	-16,5	-10,0	-12,3	-13,4	-14,6
Némésis	-13,7	-13,0	-13,7	-14,0	-5,9	-5,7	-5,5	-5,2	-5,9	-5,7	-5,5	-2,4
Imaclim R	-10,9	-13,8	-16,2	-23,5	-11,0	-12,2	-14,2	-14,0	-6,3	-8,3	-11,4	-13,7
Hausse permanente de la taxe carbone (équivalente à 1% du PIB en valeur ex ante)												
ThreeME WS	-9,2	-10,2	-11,1	-14,7	-7,2	-8,2	-8,8	-11,5	-6,5	-7,5	-8,2	-10,6
ThreeME Ph	-9,1	-10,1	-11,1	-14,7	-7,2	-8,1	-8,8	-11,6	-6,5	-7,4	-8,0	-10,8
Némésis	-11,6	-10,8	-12,4	-13,7	-3,7	-3,7	-3,9	-4,1	-2,5	-2,5	-2,7	-2,8
Imaclim R	-7,7	-8,9	-10,9	-14,7	-3,3	-3,8	-6,2	-9,9	-1,4	-2,1	-5,1	-9,9
Hausse permanente de la taxe sur l'électricité (équivalente à 1% du PIB en valeur ex ante)												
ThreeME WS	-2,1	-2,9	-3,3	-4,6	-3,9	-4,6	-5,0	-6,2	-3,0	-3,9	-4,3	-5,4
ThreeME Ph sE	-2,0	-2,8	-3,4	-4,5	-3,8	-4,5	-4,9	-6,5	-3,0	-3,7	-4,2	-5,7
Némésis	-0,5	-0,1	-0,1	-0,2	-3,7	-4,0	-4,3	-4,6	-2,3	-2,5	-2,9	-3,2
Imaclim R	-5,4	-4,2	-4,2	-7,2	-2,4	-3,1	-4,5	-6,3	-1,1	-1,9	-3,5	-6,0

* Écart au compte central, en %.

** À 35 ans pour ThreeME et Imaclim-R ; 15 ans pour Némésis.

Versions de ThreeME : WS = avec équation des salaires Wage-Setting ; Ph = avec courbe de Phillips.
Source : simulation des auteurs.

¹² Le modèle Mésange n'intègre pas de variable sur les émissions de CO₂ et est donc exclu de l'analyse dans cette partie.

¹³ La trajectoire de la taxe est calculée à partir des émissions du compte central, afin que son produit constitue annuellement 1 % du PIB de ce compte central. Le montant de la taxe carbone correspond à une taxe de 66 €2006 /t CO₂ pour Imaclim-R France à l'horizon 2035 ou encore de 79 €2015 /tCO₂ pour Némésis en 2030.

b. ... mais des divergences sur les modalités de cette réduction

Par ailleurs, la façon dont la réduction des émissions de CO₂ est obtenue est radicalement différente d'un modèle à l'autre. Pour le modèle ThreeME, la réduction des émissions de CO₂ résulte entièrement d'une plus grande efficacité énergétique (dans les processus de production ou en lien avec une moindre consommation d'énergie pour les ménages), dans la mesure où le mix énergétique est supposé ici exogène¹⁴. Pour le modèle Némésis, la réduction des émissions de CO₂ se fait *via* une recomposition endogène du mix énergétique. Par exemple, dans le cas d'une taxe carbone, la baisse des émissions de CO₂ est obtenue par celle de l'intensité énergétique qui recule de 11 % dans le modèle ThreeME, de 10 % dans Imacim-R France, mais seulement de 3 % dans le modèle Némésis. Ce dernier accorde davantage de place aux possibilités de substitution entre énergies qu'aux possibilités de réduction de la consommation d'énergie (notamment dans le domaine des transports).

Dans la réalité, les réductions de CO₂ viendront à la fois de l'efficacité énergétique et des substitutions entre énergies. Le critère à court terme pour d'éventuelles politiques de soutien serait alors le coût de la tonne de CO₂ évitée, en prenant en compte les externalités d'apprentissage ou de réseau liées aux perspectives de déploiement des filières concernées. À cet égard, la mise en place d'une fiscalité carbone permet simultanément de favoriser une plus grande efficacité énergétique dans les secteurs consommateurs d'énergie et une réorientation du mix énergétique vers les secteurs producteurs d'énergie peu émetteurs de CO₂.

On peut également souligner que le mode de réduction des émissions de CO₂ n'est pas le même à court et à long terme. La hausse du prix du pétrole au milieu des années 2000 a montré que d'importants gisements d'économies d'énergie existaient, notamment dans l'efficacité énergétique des véhicules, dans l'isolation du bâti et dans un changement des modes de consommation (par exemple par le développement du covoiturage). Cela donne du poids à l'hypothèse d'une réduction des émissions de CO₂ *via* une plus grande efficacité énergétique qui passe aussi par des évolutions technologiques et organisationnelles. Mais il peut y avoir des limites technologiques à l'efficacité énergétique, notamment dans le transport et l'industrie. Si c'est le cas, les réductions ultimes d'émissions de CO₂ seront économiquement plus rentables *via* des substitutions énergétiques et des modifications de mode de production de l'énergie.

¹⁴ Dans le modèle ThreeME, la part des énergies renouvelables est fixée pour chaque vecteur : carburant / électricité / gaz & chaleur.

I.3. Les enseignements d'Imacliim-R France pour l'évaluation des impacts macroéconomiques de la transition énergétique

I.3.1. Quelques résultats emblématiques d'Imacliim-R France

Dans cette section, nous élaborons un ensemble de scénarios permettant de mettre en évidence les caractéristiques du modèle Imacliim-R France pour la simulation d'exercices de décarbonation atteignant l'objectif de Facteur 4.

a. Le scénario de référence

Un scénario de référence est réalisé intégrant peu de politiques climatiques, hormis les avancées issues du Grenelle de l'environnement concernant les réglementations thermiques sur les nouvelles constructions et les objectifs ENR pour 2020.

La croissance de la productivité du travail suit une trajectoire de reprise économique croissant de 0,4 % aujourd'hui à 1 % par an en 2050. Combinée avec une croissance démographique de 0,3 % par an en moyenne (Source scénario central INSEE 2010), la croissance potentielle de l'économie française est de 1,07 % en moyenne sur la période, ce qui conduirait à une augmentation de 54 % du PIB français entre 2010 et 2050. L'écart entre production potentielle (population active x productivité du travail) et production réelle dépend des difficultés d'ajustement entre les décisions passées prises en information imparfaite et la réalité *ex-post* des marchés, ceci sous contrainte d'inertie des systèmes techniques et des comportements. Ces faibles taux de croissance engendrent mécaniquement une baisse du taux d'activité de la population et une hausse du taux de chômage de 10 % en 2010 à 12 % en 2050.

Concernant le secteur énergétique, l'évolution du parc de centrales nucléaires est une variable exogène au modèle. L'hypothèse considérée ici est de prolonger la durée de vie de la partie la plus récente du parc et de fermer les centrales qui atteignent 40 ans de durée de vie.

Ces éléments conduisent à une trajectoire de consommation d'énergie finale qui décroît pendant les premières années de la période de 160 Mtep à 140 Mtep sous l'effet d'une très faible croissance, puis repart à la hausse pour retrouver le niveau initial de 160 Mtep en 2050. Les émissions de CO₂ énergétique suivent le même profil : de 400 Mt CO₂ en 2010, elles décroissent durant les 25 premières années de la période puis remontent à 350 Mt CO₂ en fin de période, notamment du fait de l'arrivée en fin de vie des dernières centrales nucléaires et de leur remplacement par des centrales au gaz (Figure 2).

Dans la suite, nous réalisons quelques exercices stylisés de modélisation de manière à montrer et décrire le comportement du modèle pour justifier les choix de modélisation.

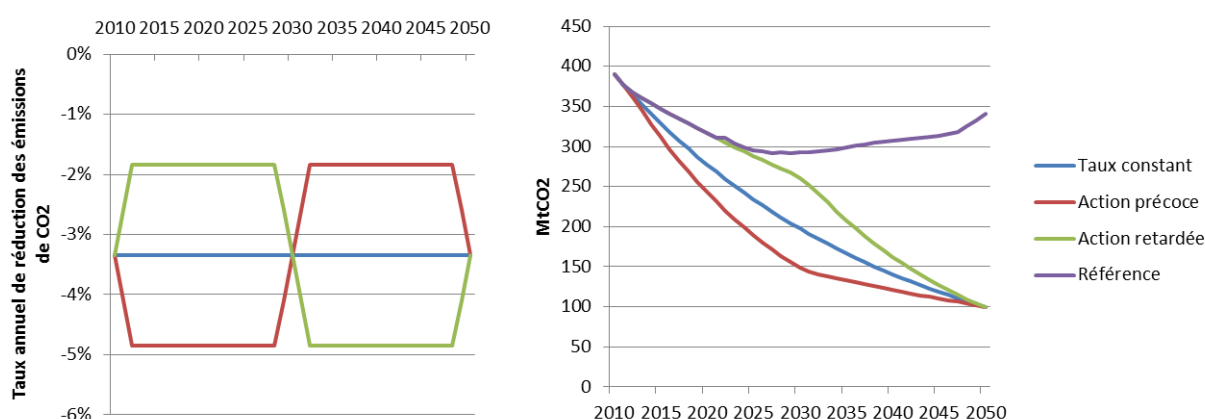
b. Trois trajectoires Facteur 4 : du *early action* au *delayed action*

Le Facteur 4, i.e. division par 4 des émissions de GES en 2050 par rapport à 1990, a été adopté en 2005 par la loi de Programmation de l'Orientation de la Politique Énergétique (loi POPE). Nous traduisons cet objectif dans ce qui suit par une division par 4 des émissions de CO₂ énergétique en 2050 par rapport à 1990. Nous représentons par la suite 3 types de trajectoires décrivant trois dynamiques d'action (Figure 2) :

- Action précoce avec un taux annuel de décroissance des émissions de CO₂ passant de 4,8 % durant les 25 premières années à 1,8 % les 25 années suivantes
- Trajectoire intermédiaire avec un taux constant de réduction égal à 3,3 % par an
- Action retardée avec un taux annuel de réduction des émissions de CO₂ passant de 1,8 % durant les 25 premières années à 4,8 % les 25 années suivantes

Le choix de ces trajectoires vise à montrer le comportement du modèle dans le cadre de trajectoires d'émissions contrastées.

FIGURE 2 : 3 TRAJECTOIRES DE REDUCTION DES EMISSIONS DE CO₂ COMPATIBLES AVEC LE FACTEUR 4



c. Une taxe carbone comme politique climatique unique

Dans cet exercice, un prix du carbone identique dans tous les secteurs et sur l'ensemble de l'économie est appliqué comme unique politique climatique pour atteindre les trajectoires décrites ci-dessus. Les résultats sont décrits dans la Figure 3. Nous considérons que les revenus de la taxe carbone sont reversés de manière forfaitaire aux ménages.

Dans le cas d'une trajectoire « Action précoce », la taxe carbone augmente fortement pendant toute la période pendant laquelle le taux de réduction des émissions est de 4,8 %. La taxe atteint alors dès 2020 100 €/tCO₂ puis près de 300 €/tCO₂ en 2027. Puis, lorsque le taux annuel de réduction tombe à 1,8 %, le niveau de taxe décroît fortement et rejoint le haut de la fourchette des trajectoires de valeur

tutélaire du carbone (Quinet, 2009)¹⁵. Pour les deux autres trajectoires avec un taux constant de réduction et d'action retardée, la date d'introduction de la taxe est plus tardive en raison de la forme de la trajectoire de référence pendant les premières années, puis le niveau de taxe croît fortement sur toute la période, atteignant un peu plus de 400 €/tCO₂ pour la trajectoire intermédiaire et 600 €/tCO₂ pour l'action retardée.

Plus l'action est précoce, plus la taxe carbone requise et les coûts de court terme sur la croissance économique sont importants, mais plus les coûts de long terme sont limités. C'est le contraire pour une action retardée. Ceci rejoint la littérature sur les coûts d'une action retardée (GIEC, 2014, Figure SPM.5). L'impact sur le PIB est cohérent avec les profils de taxe carbone (Figure 4). Les pertes maximales représentent entre 3 points de PIB pour la trajectoire intermédiaire de prix du carbone et un peu plus de 5 points de PIB pour la trajectoire d'action retardée : les pertes maximales sont d'autant plus grandes que les trajectoires de réduction d'émissions montrent des taux annuels de réduction importants. Les profils de pertes de PIB montrent néanmoins que les coûts restent transitoires et que le progrès technique induit par la taxe carbone permet de limiter la durée et l'ampleur des pertes (Crassous *et al.*, 2006). Dans le cadre de la trajectoire d'action précoce, des gains de PIB sont même observés par rapport au scénario de référence en fin de période, en raison du progrès technique induit par la taxe carbone.

Nous remarquons néanmoins que le niveau des taxes carbone nécessaires pour atteindre l'objectif de Facteur 4 est bien supérieur à celui préconisé par le rapport Quinet (2009) avec une taxe carbone représentant 100 €/tCO₂ en 2030 et croissant jusqu'à 150 à 300 €/tCO₂ en 2050. Ceci témoigne de la représentation au sein d'Imaclim-R France de barrières non financières à la décarbonation et d'une inertie des systèmes technico-économiques pour lesquels le seul levier du prix du carbone n'est pas suffisant ou pas adapté.

¹⁵ La valeur carbone du rapport Quinet (2009) résulte d'une approche coût-efficacité dans laquelle la valeur du carbone est estimée comme la valeur-prix duale de la contrainte quantitative d'émission ; pour la France cette contrainte découle des objectifs i. du protocole de Kyoto (stabilisation en 2010/1990), ii. du paquet climat-énergie européen pour 2020 (20 % de réduction des émissions, toujours par rapport à 1990), enfin iii. de l'objectif « Facteur 4 » réduction de 75 % pour 2050, inscrit dans la loi NOME de 2005.

FIGURE 3 : TAXE CARBONE CORRESPONDANT AUX 3 TRAJECTOIRES D’ACTION PRECOCE, DE TRAJECTOIRE LINEAIRE OU D’ACTION RETARDEE ET TRAJECTOIRE DU RAPPORT QUINET (2009)

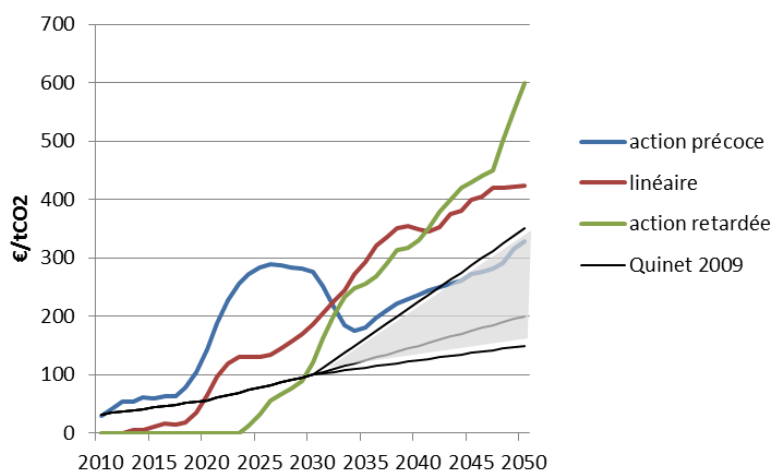
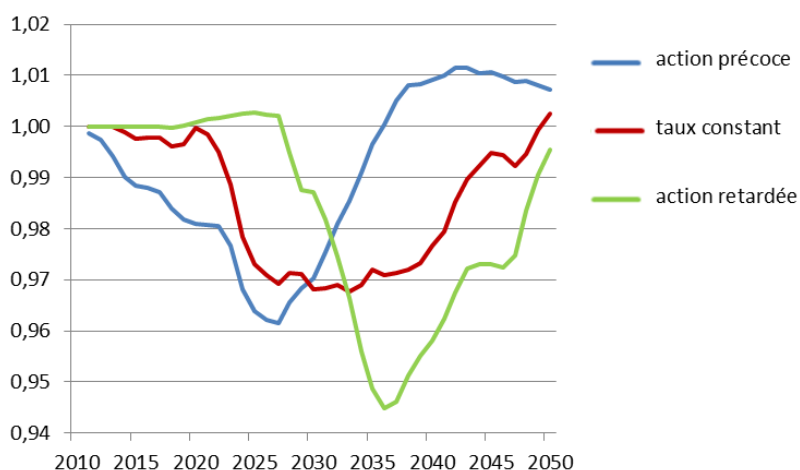


FIGURE 4 : PIB POUR LES 3 TRAJECTOIRES DE PRIX DU CARBONE PAR RAPPORT AU SCENARIO DE REFERENCE



d. Un menu de politiques et mesures sectorielles combiné à une taxe carbone pour atteindre le facteur 4

Une analyse intégrant les éléments de second rang du monde réel conduit à la nécessité d’avoir recours à des instruments économiques alternatifs, voire à une diversité d’instruments (Benbear et Stavins, 2007). Nous considérons alors la mise en œuvre d’un ensemble de politiques sectorielles visant directement la levée des barrières à la décarbonation que la taxe carbone n’est pas à même de lever seule. En reprenant la nomenclature établie par Michael Grubb (2014) dans *Planetary Economics*, décrivant les trois domaines d’action de la seconde colonne du Tableau 3, les politiques sectorielles que nous considérons relèvent du pilier I (normes, réglementation, organisation) et du pilier III (investissements structurants), la taxe carbone relevant elle du pilier II.

TABLEAU 3 : POLITIQUES SECTORIELLES CONSIDEREES SELON LEUR DOMAINE ET PILIER D'ACTION

	Pilier / type de politique	Résidentiel/Tertiaire	Transports
Potentiels sans regret mobilisables sur le court et le moyen terme, amélioration de l'efficacité énergétique	Normes, réglementation, organisation (Pilier I)	Renforcement de la réglementation sur les équipements programme de rénovation thermique couplé à des incitations (éco-prêt, crédit d'impôt)	Covoiturage, plans de déplacement entreprises, télétravail, modes « actifs », bonus-malus sur les automobiles
Substitutions de vecteurs énergétiques, décarbonation des modes de production	Marché et signaux prix (Pilier II)	Taxe carbone	Taxe carbone, tarifs d'achat pour les énergies renouvelables
Infrastructures	Investissements structurants (Pilier III)		Investissements dans des infrastructures de transport non routiers

Ainsi, pour le secteur du bâtiment et les secteurs résidentiel et tertiaire, l'enjeu est la mobilisation des potentiels d'efficacité énergétique et tout particulièrement la rénovation du parc existant. Ceci vise notamment l'*energy efficiency gap* identifié depuis longtemps par la littérature académique (Jaffe et Stavins, 1994) comme une barrière à la mobilisation des potentiels technico-économiques d'efficacité énergétique. Nous considérons des mesures d'incitation (crédit d'impôt et éco-prêt) dans le cadre d'un programme national visant à rénover la totalité du parc de bâtiments à l'horizon 2050 ainsi qu'un renforcement de la réglementation sur les équipements.

Dans le secteur des transports, les politiques ciblent une combinaison de mesures mobilisables sur le court terme visant la restriction de l'usage des voitures individuelles et une évolution des modes d'organisation (covoiturage, plans de déplacement entreprises, télétravail), des investissements favorisant le report modal vers des modes plus sobres – notamment les transports en commun et les modes dit « actifs », comme la marche et le vélo – l'amélioration de l'efficacité énergétique des véhicules et des carburants (bonus-malus) et des actions de long terme sur l'urbanisme permettant de limiter les déplacements motorisés (densification, mixité des fonctions).

Ces politiques sont représentées dans Imaclim-R France dans les modules sectoriels résidentiel et transports. Sans taxe carbone, l'ensemble de ces politiques permet de mobiliser sur le court terme des potentiels d'amélioration de l'efficacité énergétique et d'infléchir rapidement et durablement la consommation d'énergie finale par rapport au scénario de référence (Figure 5).

L'impact de ces politiques sectorielles sur le niveau de taxe carbone nécessaire à l'atteinte des trois trajectoires F4 est significatif et permet de réviser à la baisse, dans tous les cas, la trajectoire de taxe carbone (Figure 6). Il est remarquable de constater que pour les trois trajectoires de F4, le niveau de taxe carbone se retrouve désormais dans la plage de trajectoire de valeur tutélaire du carbone du rapport Quinet (2009). D'autre part, la combinaison de ces politiques sectorielles et d'une taxe carbone d'un niveau moindre permet de générer rapidement et durablement des gains de PIB par rapport au cas d'une taxe carbone seule. Ces gains sont renforcés dans le cas d'un recyclage des revenus de la taxe vers une baisse de la fiscalité sur les salaires (Figure 7).

FIGURE 5 : IMPACT DE LA TAXE CARBONE (TRAJECTOIRE F4 INTERMEDIAIRE) ET DES POLITIQUES SECTORIELLES SUR LA CONSOMMATION D'ENERGIE FINALE

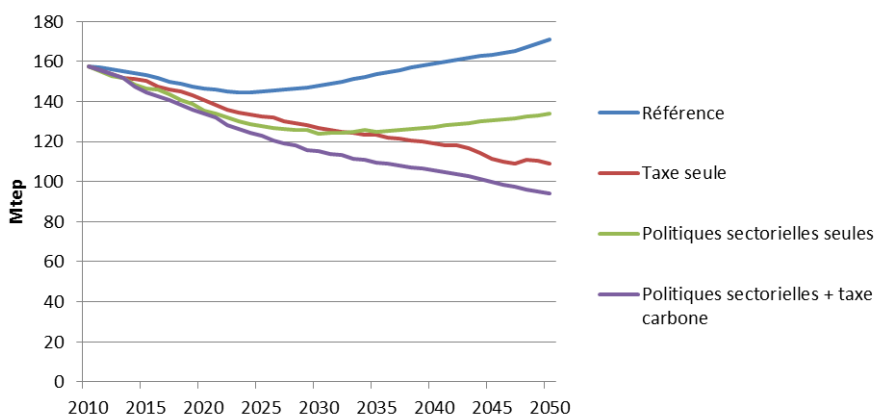


FIGURE 6 : IMPACT DES POLITIQUES SECTORIELLES POUR LES 3 TRAJECTOIRES SUR LE NIVEAU DE TAXE CARBONE – COMPARAISON A LA TRAJECTOIRE DE VALEUR TUTÉLAIRE DU CARBONE DU RAPPORT QUINET (2009)

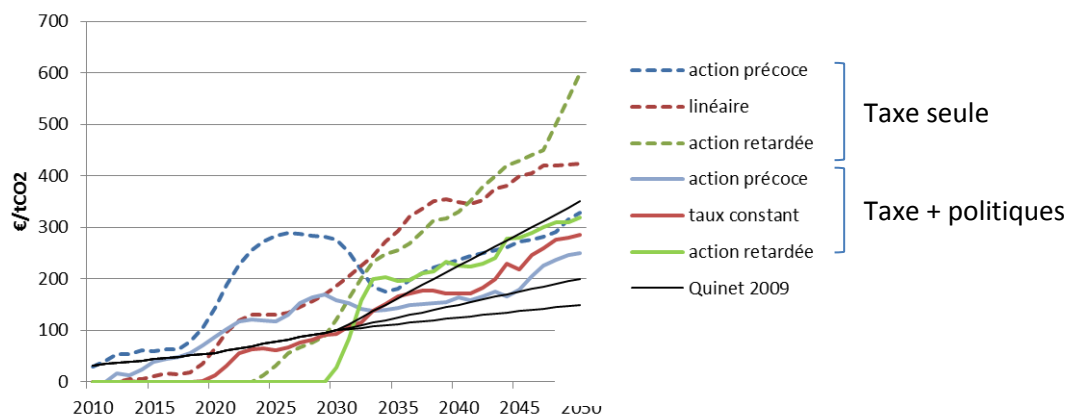
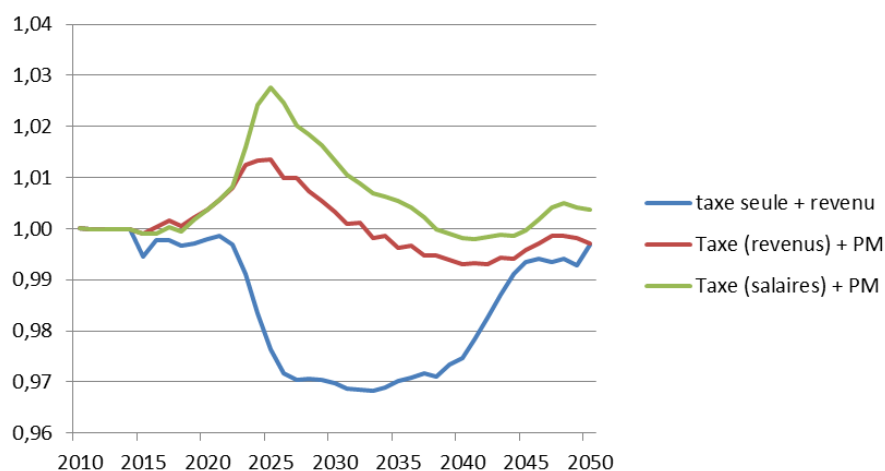


FIGURE 7 : PIB PAR RAPPORT AU SCENARIO DE REFERENCE POUR LA TRAJECTOIRE FACTEUR 4 INTERMEDIAIRE SELON LES DIFFERENTES CONFIGURATIONS DE POLITIQUES



1.3.2. Discussion sur les déterminants des impacts macroéconomiques de la transition énergétique

L'évaluation économique des trajectoires bas carbone avec Imaclim-R France montre que des gains économiques sont possibles pour atteindre le Facteur 4, par rapport à un scénario de référence. Ceci est lié à la prise en compte dans Imaclim-R France de sous-optimalités que les politiques climatiques peuvent conduire à corriger. Les gains économiques sont dus aux effets positifs combinés des politiques climatiques, qui diminuent le poids de l'énergie dans les coûts de production et dans le budget des ménages par rapport à un scénario de référence.

- Un prix du carbone et l'affichage de la progressivité au fil des ans permet ainsi une correction partielle des anticipations myopes faites sur le prix de l'énergie. Ceci introduit une correction des décisions sous-optimales d'investissement des agents dans un contexte d'augmentation des prix de l'énergie. Les acteurs économiques (secteurs et ménages) intègrent dans leurs décisions d'investissement la croissance future de la taxe carbone, ce qui permet une réorientation des investissements vers des investissements bas carbone.
- Les programmes de soutien aux technologies bas carbone complètent la tarification du carbone et favorisent les investissements précoces et les améliorations endogènes des technologies bas carbone.
- Les politiques de planification spatiale et l'évolution des décisions d'investissement pour les infrastructures à longue durée de vie permettent une réduction de la demande de mobilité et une bifurcation vers des modes de déplacement moins dépendants des énergies fossiles, alors que dans un scénario de référence ces investissements continuent de favoriser les transports

routiers. Ceci conduit à un *lock-in* sur des technologies intensives et des modes de transport intensifs en énergies fossiles, alors que les prix de l'énergie augmentent.

- Sur le court terme, des mesures en faveur du covoiturage, des modes doux ou du télétravail permettent également une réduction rapide des besoins de mobilité.

Les bénéfices des politiques climatiques sont rendus possibles par la correction des sous-optimalités qu'elles permettent. Les anticipations imparfaites conduisent, en effet, à prendre des décisions pour le futur qui ne sont pas adaptées à l'évolution des conditions économiques (particulièrement l'augmentation du prix des énergies fossiles) et l'inertie est une contrainte à l'ajustement à de nouvelles conditions économiques. La baisse du poids de l'énergie dans les coûts de production et dans le budget des ménages par rapport à un scénario de référence augmente le pouvoir d'achat des ménages pour les biens non énergétiques, ce qui conduit à une plus forte demande, à une plus forte production et enfin à un pouvoir d'achat des ménages plus important, du fait de la baisse du chômage et de salaires plus élevés.

De tels effets positifs doivent être mis en perspective : si les politiques climatiques ne sont pas bien construites ou calibrées, elles pourraient amplifier certaines des sous-optimalités prises en compte dans le modèle. Ceci renvoie par exemple aux rigidités sur le marché du travail (Guivarch *et al.*, 2011) qui pourraient freiner le développement des compétences requises de manière à faire face rapidement aux besoins pour la rénovation thermique du bâtiment ou les besoins de transitions professionnelles dans le secteur des transports routiers de marchandises. De telles rigidités pourraient augmenter considérablement le coût de la transition énergétique. Pour éviter cela, la nature progressive et anticipée de la taxe carbone est essentielle pour stabiliser les anticipations des agents économiques dans leurs décisions d'investissement.

Un point crucial est l'équilibre entre l'augmentation du prix du carbone et des investissements liés à la pénétration des technologies et équipements bas carbone d'un côté, et de l'autre l'effectivité de la pénétration de l'efficacité énergétique et du changement technique. Si l'amélioration de l'efficacité énergétique et le changement technique sont plus lents qu'espéré (du fait d'une plus forte inertie des infrastructures et équipements, de fortes rigidités sur le marché du travail ou de mécanismes de soutien peu efficaces), les économies d'énergie peuvent être insuffisantes pour compenser le surcoût des technologies bas carbone et l'augmentation des tarifs de l'énergie. Le budget énergie des ménages et le poids de l'énergie dans les coûts de production pourraient alors augmenter et conduire à des pertes économiques par rapport à un scénario « sans politiques », jusqu'à ce que l'amélioration de l'efficacité énergétique rattrape son retard.

Des pertes économiques apparaissent néanmoins en tout début de période, du fait de ce décalage temporel entre augmentation de la tarification de l'énergie et surcoût des investissements bas carbone d'un côté, et effectivité des politiques mises en œuvre de l'autre. Un moyen d'atténuer ces pertes est de recycler les revenus de la taxe carbone par un allègement des contributions sociales sur les salaires. Les politiques climatiques doivent donc s'inscrire dans un programme de réforme plus large que leur seul champ (réforme fiscale) pour que leur acceptabilité soit assurée.

1.4. Imaclim-R France comme soutien à la gouvernance de la transition énergétique

Dans cette section, nous décrivons une partie des travaux de recherche et d'expertise qui ont été réalisés grâce au modèle Imaclim-R France dans un but de soutien à la gouvernance de la transition énergétique.

1.4.1. Construction de « scénarios participatifs » [\[3\]](#) [\[7\]](#) [\[8\]](#) [\[10\]](#) [\[18\]](#) [\[26\]](#) [\[27\]](#)

En 2013 s'est tenu en France un Débat National sur la Transition Énergétique dont le groupe de travail n° 2 (Arditi *et al.*, 2013) était en charge de la comparaison et de l'évaluation des scénarios existants dans le but, si possible, de définir les trajectoires de transition énergétique. Une quinzaine de scénarios développés par des entités extrêmement différentes les unes des autres, avec souvent des intérêts divergents, ont été examinés. Les visions se sont avérées largement non conciliables, rendant ces exercices non directement utilisables par le décideur public. C'est pourquoi il n'est pas sans intérêt de revenir sur la nature des scénarios bas carbone. Ils peuvent servir en effet une diversité d'objectifs dont deux grandes familles émergent : les scénarios *product-oriented* ou *process-oriented* (Wilkinson et Eidinow, 2008 ; Hulme et Dessai, 2008 ; O'Neill *et al.*, 2008 , O'Neill et Nakicenovic, 2008). Dans le premier cas, *product-oriented*, le scénario en lui-même et son contenu en termes de trajectoire technico-énergétique sont l'objet premier du scénario. Dans le second cas, *process-oriented*, l'attention se porte sur le procédé même ayant guidé à l'élaboration du scénario dans le but de faire émerger des consensus, des niveaux minimaux d'accords ou tout au moins une compréhension commune des enjeux.

Les scénarios mis au débat énergie en France en 2013 ont été soumis en tant que produits finis et ils s'inscrivent sans aucune ambiguïté dans la première catégorie. Elaborés par des experts de l'énergie et des ingénieurs, ils laissent une large place aux aspects technologiques de la transition (Mathy *et al.*, 2011), autour desquelles défenseurs et opposants à nombre de technologies « bas carbone » s'affrontent. L'éolien, les agrocarburants, le nucléaire, les gaz de schiste, la capture et séquestration du carbone ou encore les véhicules électriques sont au cœur de ces controverses. D'autre part, une grande partie des scénarios bas carbone compatibles avec les objectifs de long terme reposent sur des

hypothèses de pénétration sans accroc des technologies bas carbone le cas échéant guidées par un seul prix du carbone uniforme.

Or, pour atteindre les objectifs bas carbone de long terme, les solutions technologiques sont requises mais insuffisantes (Knopf et al. 2010, Edenhofer et al. 2011). Des modifications en profondeur des fonctions de demandes d'énergie sont nécessaires mobilisant les mesures de maîtrise de la demande d'énergie et d'amélioration de l'efficacité énergétique, mais aussi de planification urbaine ou de mesures plus sectorielles (Whitmarsh et al. 2011). Un prix du carbone ne pourra seul guider cette transition et des combinaisons de politiques seront nécessaires (Fischer et Newell 2004, Lécuyer et Quirion 2013). Or celles-ci posent elles aussi des problèmes d'acceptabilité qu'il faut prendre en compte dans l'évaluation des trajectoires bas carbone car elles sont en capacité de ralentir la mise en œuvre de ces politiques : la taxe carbone du fait des impacts sur la compétitivité ou sur la justice sociale, les mécanismes de soutien aux ENR du fait de leur coût à long terme, les politiques de demande response ou de restriction de l'usage de la voiture individuelle pour leur atteinte à la liberté individuelle en sont quelques exemples.

Cette notion d'acceptabilité repose sur des facteurs individuels, psychologiques, de valeur (Steg et al., 2005), mais aussi institutionnels et procéduraux (Devine-Wright, 2008) et elle peut être élargie par l'amélioration de la connaissance du sujet, de la concertation, des dispositifs de compensation ou de redistribution. Pour cela, de la transparence dans les processus de décisions ainsi que la mise en œuvre de processus de participation pour engager public et parties prenantes dans le processus de décision est un prérequis et ces pratiques se sont développées dans de nombreux champs de la protection de l'environnement (Renn 1999, van Asselt et Rijkens-Klomp, 2002 ; Wilcox 2003 ; Hulse et al., 2004 ; Pahl-Wostl, 2002 ; Patel et al., 2007) ou plus spécifiquement dans le champ de l'énergie et du changement climatique (Dorfman et al 2013).

Comme préconisé par Garb et al. (2008), nous nous proposons d'appliquer une méthode de concertation à la construction de scénarios « bas carbone » avec des parties prenantes en axant le développement de ces scénarios sur la question de l'acceptabilité des politiques et des technologies¹⁶.

Ceci se fit sur la base d'une méthode de concertation réunissant une trentaine de parties-prenantes issues aussi bien du secteur privé, du secteur public et de l'Etat, que des ONG, des associations de consommateurs, des syndicats, des banques ou des collectivités territoriales. Le processus de concertation ainsi que l'ensemble des résultats économiques sont détaillés dans les deux publications [7] et [8].

¹⁶ Ceci fut réalisé dans le cadre du projet européen Encilowcarb (voir page 18).

Celles-ci sélectionnent des politiques qu'elles considèrent acceptables pour atteindre l'objectif de Facteur 4 et qui sont intégrées dans le modèle technico-économique de simulation Imaclim-R France, selon un scénario acceptabilité forte AF et un scénario acceptabilité modérée AM regroupant l'ensemble des politiques ayant recueilli le soutien de plus de respectivement 75 % et 50 % des parties prenantes. Le détail des mesures est représenté dans la Figure 8.

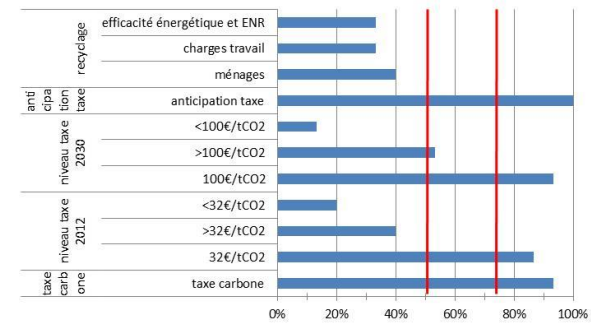
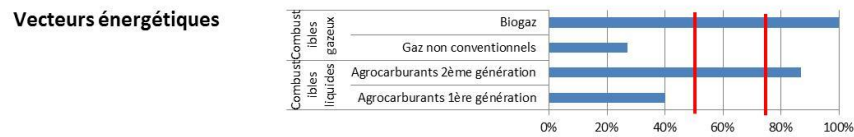
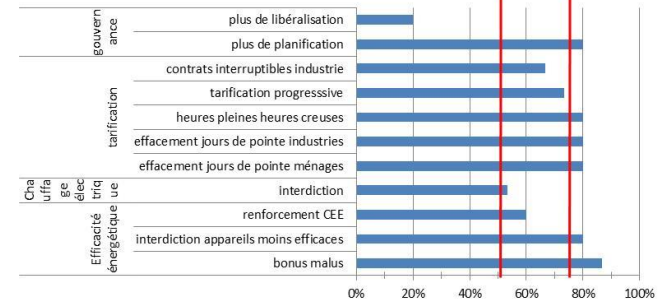
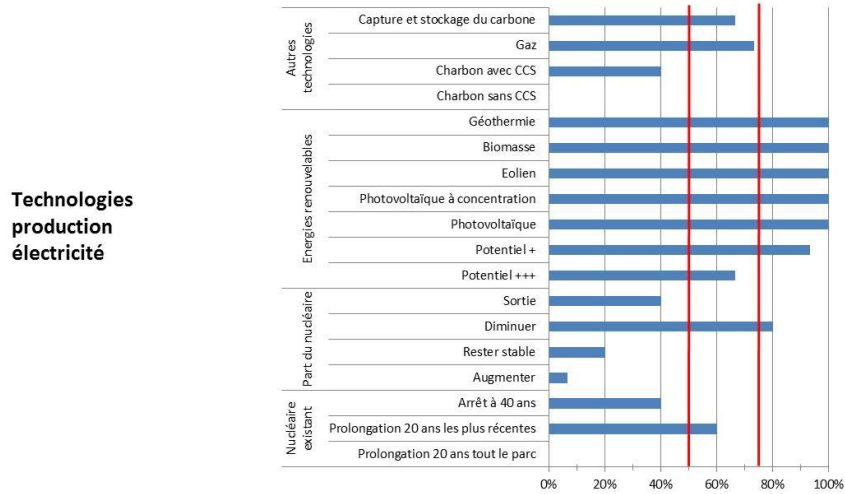
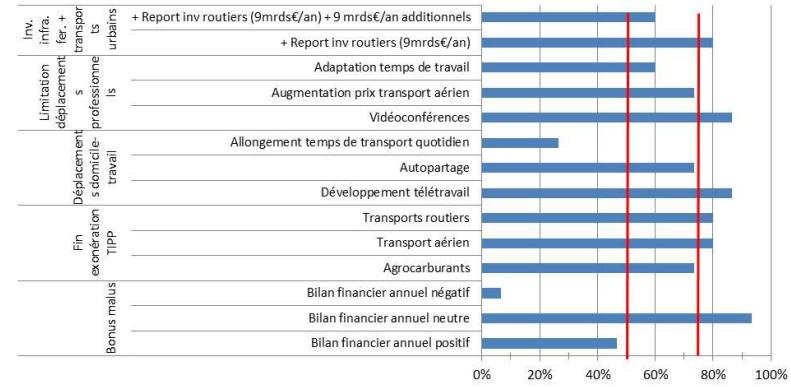
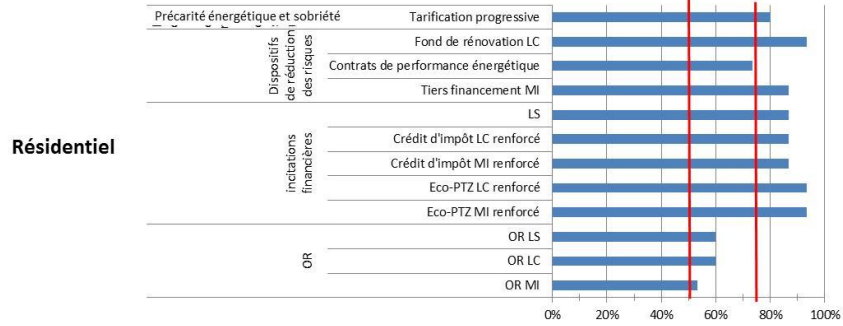


FIGURE 8: ACCEPTABILITE DES POLITIQUES (BARRE ROUGE : 50 ET 75 % DE SOUTIEN DES PARTIES PRENANTES)

Le scénario AF comprend :

- Dans le secteur résidentiel, un ensemble de mesures incitatives financières et non financières permettant de faire baisser le coût et de partager le risque pour le décisionnaire de travaux de rénovation thermique et une tarification progressive de l'électricité.
- Dans le secteur des transports, la pénétration de voitures efficaces et de véhicules hybrides soutenu par un système de bonus-malus, les véhicules électriques restant cantonnés à des marchés de niche, la fin des exonérations de la TIPP, des mesures « douces » visant à limiter la mobilité subie et un report substantiel des investissements routiers vers le ferroviaire et les transports urbains.
- Dans le secteur de l'électricité, des mesures visant à renforcer l'efficacité énergétique des équipements, à « lisser » la courbe de charge, le développement des ENR, la baisse de la part du nucléaire et la prolongation des 40 GW des centrales nucléaires les plus récentes pour une durée de 20 ans¹⁷.
- Une taxe carbone aux valeurs préconisées par le rapport Quinet (2009), avec affichage *ex-ante* de la progressivité de la valeur de la taxe et recyclage des recettes sous forme de chèque vert vers les ménages¹⁸.

Le scénario AM comprend toutes les mesures de AF, auxquelles sont ajoutés des investissements supplémentaires vers les modes de transport alternatifs à la route, une obligation de rénovation pour l'ensemble du parc de bâtiments, en commençant par le logement social et en étalant la mise en œuvre de l'obligation de rénovation de manière à lisser le nombre de rénovations dans le temps, en commençant par les logements les plus énergivores, et un développement plus important de l'éolien terrestre.

Dans le scénario AF, les émissions diminuent en 2050 de 58 à 72 %, et dans le scénario AM de 68 à 81 % selon les hypothèses faites sur les prix de l'énergie. Les mesures de réduction des émissions, dont la plus emblématique est la taxe carbone, sont bénéfiques pour l'emploi et la croissance économique. Elles permettent en outre de réduire rapidement et durablement le budget des ménages dédié aux services énergétiques. Ce résultat constitue un socle solide sur lequel construire l'acceptabilité des trajectoires Facteur 4 et le processus un cadre pour renforcer l'apprentissage collectif autour de l'acceptabilité des politiques climatiques. Ainsi, au-delà des résultats issus de l'évaluation technico-

¹⁷ Cette option n'a pas recueilli 75 % de soutiens, mais c'est celle qui avait recueilli le plus de voix.

¹⁸ Les deux autres options envisagées, que sont le recyclage vers une baisse des charges sur l'emploi et vers un soutien à l'amélioration de l'efficacité énergétique et le développement des ENR, ont également été testées, mais elles ne modifient qu'à la marge les résultats présentés dans la partie suivante.

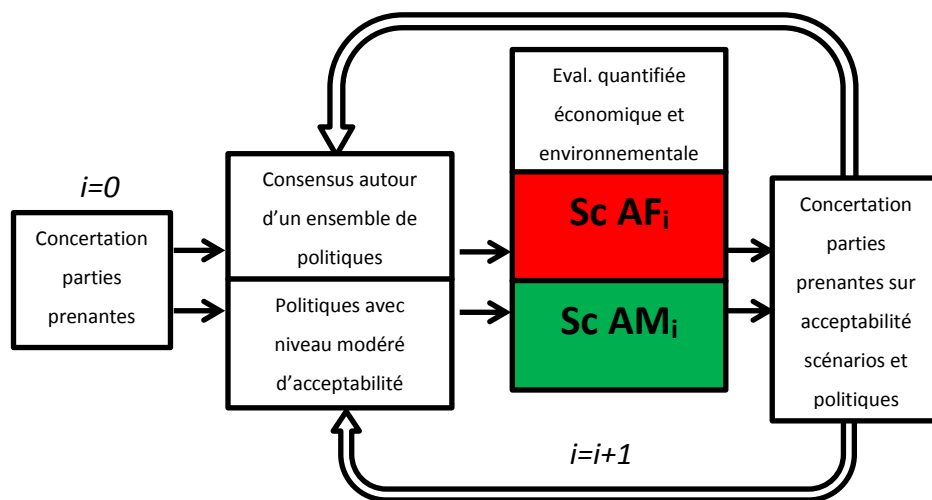
économique menée avec Imaclim-R France, le processus participatif nous livre quelques éclairages sur les politiques à mettre en œuvre et sur la gouvernance de la transition énergétique.

- i) Les résultats montrent que l'atteinte du Facteur 4 nécessitera, au-delà de mesures qui peuvent recueillir un degré significatif de faisabilité sociotechnique, des dispositifs qui demanderont un fort volontarisme politique.
- ii) De manière non surprenante, le processus avec les parties prenantes confirme le constat issu de nombreuses études empiriques (Eriksson *et al.*, 2006, 2008 ; Joireman *et al.*, 2001 ; Schuitema *et al.*, 2011 ; de Groot and Schuitema, 2012) que les incitations recueillent un plus large soutien que des mesures plus coercitives : l'exemple du secteur résidentiel et les mesures à mettre en œuvre pour permettre de rénover l'ensemble du parc existant en est un bon exemple.
- iii) Néanmoins, des facteurs procéduraux ainsi que des éléments de design des politiques telles que les démarches participatives, les arrangements institutionnels, les compensations nécessaires pour répondre aux enjeux de justice sociale ou la création de mécanismes de financement spécifiques, peuvent améliorer la faisabilité sociotechnique de certaines mesures. Les politiques de tarification gagnent en acceptabilité si les revenus sont utilisés pour financer des politiques climatiques ou des projets en lien avec la mitigation. L'acceptabilité ne doit pas être considérée comme une caractéristique innée et statique des politiques. Au contraire, par exemple, le design de la taxe carbone est un élément déterminant de son niveau d'acceptabilité : les parties prenantes insistent sur l'importance de la nature prédéfinie et progressive de la trajectoire de la taxe dans le temps pour que les agents économiques puissent intégrer la croissance de la taxe carbone dans leurs décisions et choix d'investissements. Dans le secteur résidentiel, les mécanismes financiers tels que le tiers financement, à même de réduire le risque d'investissement et la nécessité d'emprunt, sont essentiels. Enfin, le développement de financements participatifs peut être déterminant pour l'appropriation des projets et le déploiement à grande échelle des énergies renouvelables.
- iv) Quoiqu'il en soit, la construction d'un consensus autour d'un socle de mesures plus facilement implémentables peut aider à la mise en marche de la transition énergétique. Ces politiques pourraient être déployées en premier et leur efficacité agir comme levier sur l'acceptabilité d'autres mesures. Par exemple, la mise en œuvre rapide de mesures performantes d'efficacité énergétique peut élargir le soutien pour la mise en œuvre d'une taxe carbone en en réduisant l'impact sur le budget des ménages. Dans le secteur résidentiel, la création d'une obligation de fonds de garantie dans les copropriétés pourrait

conduire à la réduction des risques spécifiques à ce type de projet ; un vaste programme de rénovation thermique dans le logement social pourrait également accélérer les gains d'apprentissage. Ces deux exemples contribueraient à renforcer le soutien ultérieur à une obligation de rénovation.

Une dimension itérative au processus décrit ici pourrait aisément être mise en place (Figure 9), de manière à ajuster l'ensemble des politiques intégrées à AF sur la base des résultats fournis par l'évaluation économique des politiques intégrées au sein des scénarios AF et AM et l'éloignement des réductions obtenues par rapport à l'objectif F4. La concertation aboutissant à un ensemble de politiques acceptables avec un certain niveau de consensus constitue un socle à partir duquel de nouvelles politiques, a priori jugées moins acceptables, peuvent être intégrées dans une vision dynamique. Cette forme d'itérations pourrait s'inscrire dans des types de gouvernance réflexive (Brousseau et Dedeurwaerdere, 2012). Malheureusement, cette démarche n'avait pas pu être mise en œuvre lors du processus présenté ici pour des raisons de contraintes de temps liées au calendrier du projet européen dans lequel ce travail s'inscrivait.

FIGURE 9: PROCESSUS ITERATIF POUR ELARGIR L'ENSEMBLE DES POLITIQUES ACCEPTABLES



1.4.2. Evaluation économique des trajectoires types du Débat National sur la Transition Energétique [17] [32]

Dans le cadre du Débat National sur la Transition Energétique de 2013, le groupe de travail sur les scénarios et trajectoires a basé ses réflexions sur deux piliers : le Facteur 4 et la réduction de la part de

l'énergie nucléaire à 50 % de la production d'électricité en 2025¹⁹ (sans indication sur le devenir de cette part après 2025).

Le processus qui s'est alors mis en place présentait une originalité certaine car, sans doute pour la première fois dans l'histoire des politiques énergétiques en France, le scénario n'était pas donné *ab initio* par un dispositif politico-administratif ; qui plus est, il s'agissait de discuter non pas d'un mais de plusieurs scénarios ou trajectoires contrastés. Et en effet un processus très large d'inventaire des images du futur énergétique à long terme, telles que produites par la société civile (associations, ONG, centres de recherche) a été entrepris. Seize scénarios ont été retenus, scénarios de facture très différente, mais présentant tous un bon niveau de pertinence et de cohérence interne. Les premiers examens ont fait apparaître d'énormes différences, avec par exemple une consommation d'électricité variant selon les cas entre 280 et 840 TWh en 2050, contre 450 TWh aujourd'hui.

Cette base de données de seize scénarios constituait une base très riche mais à l'évidence inutilisable en tant que telle. Il fallait en effet que les différents collèges (ONG environnementales, autres ONG, employeurs, syndicats, parlement, collectivités locales et administration) puissent analyser et comparer un nombre plus limité d'objets communs. Il fut donc décidé d'identifier des familles de scénarios ou trajectoires énergétiques, en nombre réduit mais permettant néanmoins de regrouper l'ensemble des scénarios spécifiques. Quatre trajectoires furent finalement considérées (Tableau 4).

Trois de ces quatre trajectoires respectent les deux contraintes identifiées ci-dessus, la dernière ne respectant pas l'objectif de diminution de la part du nucléaire en 2025. Les éléments discriminants de ces quatre futurs sont : i) la réduction des consommations d'énergie finale supposée à l'horizon 2050 et ii) le poids relatif de l'énergie nucléaire et des énergies renouvelables dans la production d'électricité. Les quatre trajectoires balayent une gamme très large de futurs énergétiques possibles pour la France, et elles fournissent ainsi une bonne cartographie. Sauf à considérer une rupture technologique majeure ou des hypothèses qui bouleverseraient les données du jeu, il est difficile d'imaginer un futur échappant complètement à l'une de ces quatre trajectoires.

La récente loi sur la Transition Énergétique pour la Croissance Verte adoptée en 2015 présente des objectifs s'inscrivant plutôt dans la perspective de la trajectoire Efficacité (Tableau 5).

¹⁹ Cet objectif fut introduit lors de la campagne pour les élections présidentielles dans le cadre de l'accord PS-Verts et repris par le candidat devenu président François Hollande.

TABLEAU 4: CARTOGRAPHIE DE LA TRANSITION ENERGETIQUE EN FRANCE SELON QUATRE TRAJECTOIRES

		Mix énergétique	
		Diversification	Priorité à une source d'énergie
Réduction de la demande finale d'énergie en 2050 par rapport à 2010	-20 %	<p>1. DIVERSITE (DIV)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Difficultés à réduire de manière significative les consommations d'énergie • La part du nucléaire dans le mix électrique se stabilise à 25 % après 2025 • 40 % de renouvelables dans le mix électrique en 2050 	<p>2. DECARBONISATION (DEC)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Difficultés à réduire de manière significative les consommations d'énergie • La part du nucléaire dans le mix électrique reste sur toute la période égale à 75 % • La part des renouvelables est limitée à 20 % dans le mix électrique après 2020
	-50 %	<p>3. EFFICACITE (EFF)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Réduction des consommations d'énergie grâce aux meilleures technologies disponibles • La part du nucléaire dans le mix électrique diminue après 2025 à 25 % en 2050 • 70 % de renouvelables dans le mix électrique en 2050 	<p>4. SOBRIETE (SOB)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Changements majeurs des modes de vie et de consommation • Sortie totale du nucléaire d'ici 2050 • 90 % de renouvelables dans le mix électrique en 2050

TABLEAU 5 : OBJECTIFS DE LA LOI DE TRANSITION ENERGETIQUE POUR LA CROISSANCE VERTE

	Ref year	2020	2025	2030	2040	2050
GHG emissions	1990			-40%		-75%
Final energy consumption	2012			-20%		-50%
Fossil energy consumption	2012			-30%		
Renewables in overall consumption (%)		23%		32%		
Renewables for heating (%)				38%		
Renewables for fuel (%)				15%		
Renewables for gas (%)				10%		
Renewables for electricity (%)				40%		
Nuclear power in electricity generation (%)			50%			
Charging stations for electric vehicles				7 million		
Thermal rehabilitation projects per year		500,000	500,000	500,000	500,000	500,000

Pourtant, même si les objectifs sectoriels de la loi TECV montrent implicitement l'adoption d'une trajectoire Efficacité comme trajectoire de décarbonation « préférée », les incertitudes sur la capacité à atteindre une réduction de 50 % de l'énergie finale doivent être prises en compte. Si cet objectif ne peut être effectivement mis en œuvre, plus d'énergie décarbonée sera nécessaire. Voilà pourquoi, en France, la question liée à la gestion dynamique de la transition énergétique conduit à considérer la stratégie Diversité comme une trajectoire d'ajustement dynamique de la trajectoire Efficacité²⁰. Cependant, cette option nécessite un déploiement plus important d'énergie décarbonée, notamment au travers de l'électricité d'origine nucléaire et d'une plus grande mobilisation des ressources de biomasse.

Chacune de ces deux stratégies est confrontée à ses propres obstacles et incertitudes (Tableau 6). Ainsi une stratégie type Efficacité implique notamment de surmonter *l'energy efficiency gap* pour permettre un grand programme de rénovation thermique du stock de bâtiments existants, ainsi que des changements significatifs dans les comportements de mobilité. Ce n'est qu'à cette condition que les énergies renouvelables pourront jouer un rôle prépondérant, en produisant près de 70 % de l'électricité consommée : l'objectif sera alors d'atteindre 50 % d'ENR variables dans la production d'électricité. Un découplage du transport de marchandises par rapport à la croissance économique est également nécessaire. Pour une stratégie Diversité, les enjeux principaux résident dans la mobilisation d'une offre énergétique décarbonée beaucoup plus importante, mais cet objectif peut se heurter aux difficultés de développement de nouvelles centrales nucléaires – à un coût compétitif, mais en conformité avec les normes de sécurité post Fukushima – de la disponibilité de la technologie de capture et stockage du carbone dans l'industrie et la possibilité de produire et mobiliser des quantités très élevées de bioénergie.

Les trajectoires EFF et DIV sont analysées de manière extensive dans le rapport DDPP_FRANCE (2015) (voir page 17). Un ensemble de politiques et mesures sectorielles cohérentes avec les spécificités de chacune de ces stratégies (Tableau 6) sont implémentées dans Imaclim-R France.

²⁰ La trajectoire Sobriété pourrait également être considérée comme une alternative à Efficacité dans le cas d'une décision de sortie du nucléaire. Mais une telle option n'est pas à l'ordre du jour en France. En revanche, dans la trajectoire Décarbonation, l'énergie nucléaire conserve sa part de 75 % jusqu'en 2050, ce qui n'est pas compatible avec l'objectif officiel de réduction de la part du nucléaire dans le mix électrique à 50% en 2025. En outre, la trajectoire Décarbonation est orthogonale à la trajectoire Efficacité dans la typologie du Tableau 4 et est porteuse d'une vision très différente de l'évolution vers un système d'énergie décarbonée par rapport à l'efficacité.

TABLEAU 6 : DESCRIPTION DES PRINCIPAUX INDICATEURS SECTORIELS DES STRATEGIES EFF ET DIV

	Programmes et stratégies	
Secteur	EFF	DIV
Résidentiel – parc existant	650 000 rénovations par an et rénovation de 100 % du parc de logements anciens d’ici à 2050	350 000 rénovations par an et rénovation de 55 % du parc de logements anciens d’ici à 2050
Tertiaire	23 Mm ² rénovés par an (rénovation de 100 % du parc tertiaire)	15 Mm ² rénovés par an (rénovation de 60 % du parc tertiaire existant d’ici à 2050)
Transport de marchandises	Stabilisation des t.km transportées en 2050 au niveau de 2010 après une hausse jusqu’en 2030	Augmentation des t.km de 55 % en 2050 par rapport à 2012
Transport de passagers	Stabilisation des passagers.km en 2050/2012 soit une diminution de 15 % par tête de la mobilité	Augmentation (prolongation tendancielle) de la demande de mobilité individuelle (+ 25 %/2012)

En particulier, la taxe carbone nécessaire pour atteindre l’objectif de Facteur 4 pour chacune de ces stratégies atteint 360 €/tCO₂ en 2050 dans EFF et 280 €/tCO₂ dans DIV. Les revenus de cette taxe représenteraient dès son introduction entre 15 (DIV) et 20 (EFF) milliards d’euros, soit environ 1 % du PIB. Les investissements cumulés agrégés sont similaires dans chaque scénario, mais le scénario DIV reposerait principalement sur des investissements relevant des industries de l’énergie, alors que pour la trajectoire EFF la contrainte reposerait davantage sur les consommateurs finaux (Figure 10). La baisse de la consommation d’énergie et la croissance du recours à des énergies non fossiles diminueraient drastiquement la facture énergétique et la balance commerciale. Les dépenses des ménages en services énergétiques dans le scénario EFF, malgré le déploiement d’un programme de rénovation thermique de l’habitat, diminuent beaucoup plus que dans DIV. La croissance économique dans EFF est supérieure à celle de DIV : le taux annuel moyen de croissance économique est supérieur de 0,1 % sur la période conduisant à un PIB 2,4 % supérieur en 2050 dans EFF par rapport à DIV. Cette différence est principalement due à la diminution du budget énergie des ménages et des industries, lequel peut se reporter vers d’autres consommations, ce qui induit plus d’activités pour l’économie française (Figure 11). Entre 300 000 et 600 000 emplois seraient créés dans la stratégie EFF par rapport à la stratégie DIV, principalement dans le secteur des services (Tableau 7).

FIGURE 10 : INVESTISSEMENTS ANNUELS MOYENS DANS LES SECTEURS DE LA PRODUCTION D'ELECTRICITE ET DANS LA RENOVATION THERMIQUE DE L'HABITAT

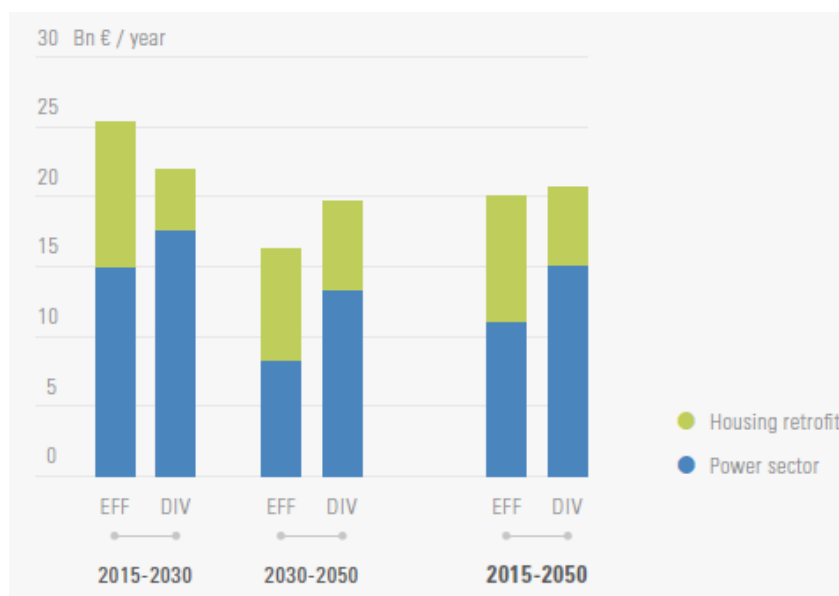


FIGURE 11 : PARTS DU BUDGET DES MENAGES CONSACREES AUX SERVICES ENERGETIQUES

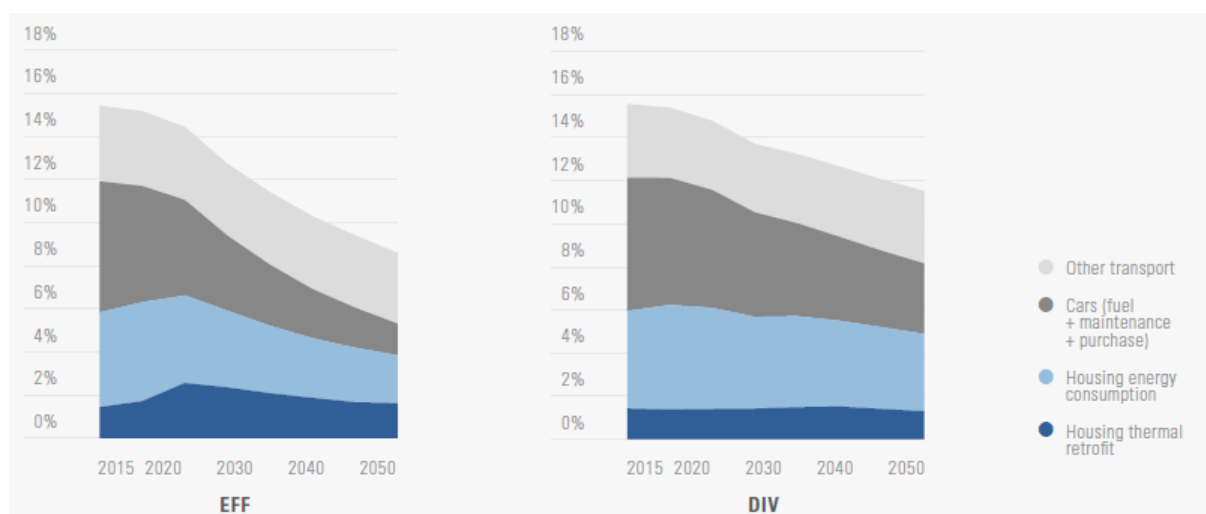


TABLEAU 7 : DIFFERENCE DES EMPLOIS SECTORIELS ENTRE EFF ET DIV (EFF-DIV ; LES NOMBRES POSITIFS SIGNIFIENT PLUS D'EMPLOIS DANS EFF QUE DANS DIV) – MILLIERS D'EMPLOIS

	2030	2050
Energie	0	-20
Industrie	-100	-350
Agriculture	-200	-230
Transports	70	30
Services	830	860
Total	600	290

1.4.3. Le pilotage de la transition énergétique [2]

a. Les trajectoires d'ajustement dynamique de la transition énergétique en France

Contrairement à une vision statique des trajectoires de décarbonation qui seraient définies une fois pour toutes²¹, nous analysons ici les conséquences pour le décideur public de la nécessité d'adopter une démarche d'ajustement dynamique des trajectoires de décarbonation tout au long de leur mise en œuvre. Les stratégies de décarbonation reposent sur un certain nombre de solutions innovantes (à savoir des technologies, des modèles de comportement, des instruments de la politique et des cadres institutionnels), pour lesquels il existe encore de nombreuses incertitudes quant à l'efficacité de leur mise en œuvre dans les décennies qui nous séparent de 2050. Ainsi, le choix d'une trajectoire devra tenir compte de la nature spécifique des incertitudes structurelles, comme de la capacité des politiques mises en œuvre à atteindre à temps leurs objectifs prédéterminés. La possibilité de diverger d'une trajectoire initiale sans encourir de coûts excessifs et sans mettre en danger l'objectif ultime de décarbonation doit être un élément central dans la conception d'une stratégie.

Différents paradigmes de planification permettant de gérer de telles incertitudes ont vu le jour. Ceux-ci considèrent la mise en œuvre des politiques comme des expériences qui favorisent l'apprentissage au fil du temps (Dewey, 1927) et l'élaboration des politiques comme un élément faisant partie intégrante des « narratifs » des scénarios. La première démarche vers la planification adaptative a été l'approche *assumption based planning* développée par Dewar en 1993. Il ne s'agit pas d'un outil pour élaborer une planification, mais elle permet d'améliorer l'adaptabilité et la robustesse de planifications existantes. Walker *et al.* (2001) proposent une méthodologie d'élaboration adaptative des politiques (*adaptive policymaking*) qui permette d'adapter les politiques à des contextes changeants, à des résultats insuffisants par rapport aux objectifs ou à des événements inattendus. Celle-ci est centrée sur un mécanisme de monitoring combiné à des actions contingentes. Au-delà de l'adaptation de politiques isolées, Haasnoot *et al.* (2011 ; 2012) proposent une méthodologie d'élaboration de plans *Dynamic Adaptive Policy Pathways* définis comme une séquence d'actions visant à éviter la survenue de *lock-in*. Cette approche est basée sur des points de bifurcation ou *tipping points* qui signalent des conditions dans lesquelles les politiques commencent à ne plus opérer de manière efficace et

²¹ La communauté de modélisation du système énergétique a analysé de manière extensive l'impact par exemple des incertitudes socio-économiques ou du progrès technique sur les scénarios bas carbone et sur leurs coûts (Markandya and Pemberton, 2010; Zeng *et al.*, 2011; Kann and Weyant, 2000). Des méthodes spécifiques comme les décisions séquentielles (Parson and Karwat, 2011) ou des méthodes pour analyser la robustesse des scénarios (Lempert, 2000; Groves and Lempert, 2006) ont été développées. Cette littérature considère les scénarios comme statiques dans le sens où ils sont définis une fois pour toutes et qu'aucune trajectoire alternative n'est définie pour s'adapter à des circonstances inattendues.

nécessitent alors la mise en œuvre de nouvelles actions pour atteindre les objectifs. De telles approches de planification ont suscité l'attention dans différents domaines d'intervention : la gestion de l'eau, l'adaptation au changement climatique, les politiques de transport, entre autres (Swanson et Bhadwal, 2009 ; Walker *et al.*, 2010 ; Haasnoot *et al.*, 2013), mais pas encore dans le cadre de définitions de trajectoires de décarbonation. C'est ce que nous faisons ici.

Ces enjeux doivent tenir compte des incertitudes spécifiques à chacune des options de décarbonation et de leurs politiques sous-jacentes quant à leur capacité à atteindre le déploiement nécessaire. Ainsi, par exemple, il doit être envisagé que les efforts de R&D s'avèrent incapables de fournir en temps et en heure et à des coûts compétitifs la prochaine génération de réacteurs nucléaires ou la technologie de CCS pour des trajectoires reposant sur ces technologies (Escobar, Rangel et Levêque, 2015 ; Anadon, 2013 ; Boccard *et al.*, 2014 ; Kern *et al.*, 2016 ; Global CCS Institute, 2013). Dans ce cas, il faut pouvoir faire bifurquer la stratégie de décarbonation vers de nouvelles trajectoires n'incorporant pas ces technologies. Par contre, pour d'autres options de décarbonation comme le développement des énergies renouvelables, l'électrification des usages énergétiques et la réduction de la demande finale d'énergie, les incertitudes sont moins radicales : les technologies sont d'ores et déjà disponibles et l'aléa concerne davantage la vitesse à laquelle ces options pourront se déployer. Il existe ainsi un portefeuille diversifié d'options (incluant le solaire, l'éolien, la biomasse, la rénovation thermique de l'habitat, l'efficacité énergétique dans le secteur industriel, l'évolution des modes de consommation et des modes de vie) disponibles pour atteindre les objectifs. Si l'une de ces options s'avérait plus difficile à déployer que prévue (car trop coûteuse pour les finances publiques ou pour les consommateurs), d'autres options pourraient être davantage sollicitées pour compenser. Ainsi, la possibilité de pouvoir mobiliser un ensemble de stratégies et de technologies permet de préserver les options futures. La performance des politiques peut être limitée par le poids économique que les subventions et incitations peuvent représenter pour les ménages (Marcantoni et Ellerman, 2015 ; Marcantoni et Valero, 2015) si les coûts ne décroissent pas suffisamment vite ou si les mesures d'accompagnement pour faire face aux barrières non économiques et faire baisser les coûts de transaction, sont insuffisantes. La spécificité de chacune des options de décarbonation sur lesquelles repose une trajectoire de décarbonation doit donc être intégrée aux enjeux de gestion dynamique de la décarbonation.

b. Les enjeux de gestion dynamique des trajectoires de décarbonation en France et en Allemagne

Pour aller plus loin dans l'analyse, nous nous sommes intéressés dans [2] aux enjeux de gestion dynamique spécifiques aux trajectoires de décarbonation en France et en Allemagne. Dans ces pays, les débats nationaux sur l'énergie ont conduit à l'adoption d'une trajectoire combinant de hauts

niveaux de diffusion des énergies renouvelables et un objectif ambitieux de réduction de la demande d'énergie finale (entre 40 et 50 % en 2050 par rapport à 2010).

En France, la principale incertitude renvoie à la capacité à diviser par deux la demande d'énergie et en particulier de rénover l'ensemble du parc de bâtiments existant en 35 ans. Une des marges de manœuvre possibles pour compenser une moindre diminution de la demande d'énergie serait un recours plus important au nucléaire. La durée de construction d'une centrale nucléaire étant incertaine et pouvant dépasser une dizaine d'années, il y a un enjeu fort pour un système de *monitoring* permettant d'être en capacité de décider suffisamment tôt de l'adaptation de la trajectoire centrale de décarbonation. En Allemagne, la décision de sortie du nucléaire limite l'étendue des alternatives et toutes les trajectoires de décarbonation nécessitent un niveau très important de renouvelables et de réduction de la demande d'énergie.

Chacune de ces études de cas fournit des éléments également intéressants pour l'élaboration d'un système de gestion dynamique des trajectoires de décarbonation. Dans le cas allemand, un système de *monitoring* surveille chaque année l'avancement des objectifs sectoriels, au travers d'un ensemble d'indicateurs permettant de formuler un diagnostic régulier des ajustements nécessaires. Ceci est un élément essentiel pour limiter les coûts d'ajustement des trajectoires de décarbonation. Néanmoins, il faut également prendre en compte le fait que si les agents économiques savent que la gestion de la décarbonation sera dynamique et donc incertaine, ils peuvent modifier leurs anticipations en amont. Ceci peut favoriser les stratégies d'attente et conduire à un retard dans les investissements nécessaires. Inversement, des scénarios clairs peuvent permettre d'éviter ces stratégies d'attente : ainsi l'adoption en France, dans le cadre de la loi TECV en 2015, d'une trajectoire de prix du carbone entre 2015 et 2030 suivant les préconisations du rapport Quinet (2009) contribue à une stabilisation des anticipations de ces agents économiques, en garantissant une rentabilité de certains investissements bas carbone.

c. Combiner des incitations de long terme avec des politiques d'ajustement informées par un système de monitoring

Une gestion dynamique de la décarbonation doit donc combiner des signaux de long terme et des politiques d'ajustement dynamiques. Les signaux de long terme sont importants pour les consommateurs et les investisseurs, parce qu'ils permettent des anticipations stables, qu'ils facilitent les décisions à long terme en matière d'innovation, le déploiement de nouvelles infrastructures et l'investissement dans des actifs à vie longue. Une taxe carbone dont la progressivité dans le temps serait affichée peut jouer en partie ce rôle. Blyth *et al.*, (2007) soulignent à ce titre le rôle de la certitude

réglementaire à long terme pour minimiser les risques de l'investissement dans les technologies à faible intensité carbonique.

Afin de limiter l'effet des incertitudes dans leur mise en œuvre, les politiques doivent être flexibles et construites de façon à privilégier les éléments qui accroîtront leur robustesse et leur résilience. La recherche de stratégies robustes conduit à mettre l'accent sur des politiques adaptées à des environnements très différents, au plan domestique ou international (Lempert, 2000). La résilience suppose que les macrosystèmes énergétiques soient susceptibles de demeurer fonctionnels en cas d'accident ou de forte instabilité, ou qu'ils puissent retrouver rapidement un état d'équilibre après de telles perturbations. Il faut donc bien distinguer robustesse et résilience : la recherche de solutions robustes concerne donc les stratégies à développer, celle de solutions favorisant la résilience concerne plutôt les systèmes techniques et institutionnels mis en œuvre dans la transition.

Une gestion des incertitudes favorisant la robustesse des stratégies et la résilience des systèmes peut être construite en identifiant : i) les politiques communes à toutes les trajectoires, au moins dans une première phase de lancement ; ii) les politiques qui sont contraintes par de fortes inerties et délais de réaction ou de mise en œuvre à prendre en compte dans le timing de la décision ; iii) enfin des politiques qui préservent les libertés de choix dans le futur et présentent donc d'importantes valeurs d'option.

Pour l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, à l'échelle microéconomique le temps de déploiement est seulement de un ou deux ans, à partir de la décision d'investir. La principale difficulté concerne la montée en puissance à une vitesse et selon un volume suffisant. Il faut pouvoir déclencher un grand nombre de décisions d'investissement parmi un très grand nombre de décideurs. Les autres options de décarbonation de l'offre énergétique, que sont le nucléaire et le CCS ou le développement des réseaux et des infrastructures de stockage, posent un problème d'une nature très différente. Ces investissements sont souvent très importants et indivisibles, avec des délais de mise en œuvre et des temps de retour longs. Enfin, ils sont à bien des égards irréversibles. L'approche des options réelles pourrait être sollicitée pour explorer ces enjeux (Kumbaroğlu *et al.*, 2008 ; Yang *et al.*, 2008 ; Ritzenhofen *et al.*, 2015).

Nous proposons les éléments suivants pour la conception d'un processus de suivi pour l'ajustement dynamique des politiques de décarbonation. Ce cadre suit les recommandations faites par Walker *et al.*, (2001), Kwakkel *et al.*, (2015) et Haasnoot *et al.*, (2013).

Tout d'abord, un ensemble d'objectifs supérieurs est fixé (cf. la liste d'indicateurs proposés par la commission de suivi de *l'Energiewende* en Allemagne dans le Tableau 8).

TABLEAU 8: LISTE D'INDICATEURS PROPOSES PAR LA COMMISSION DE SUIVI DE L'ENERGIEWENDE EN ALLEMAGNE

Superordinate targets	Greenhouse gas emissions
	Phase-out of nuclear power
Energy supply	Share of renewables in gross final energy consumption
	Final energy consumption
Security supply	Average outage duration for electricity
	Power balance
Economic viability	Innovation
	National energy accounts
Society	Social impacts (high cost/ low income)
	Acceptance

Parallèlement, la trajectoire énergétique choisie doit être déclinée selon des objectifs quantitatifs sectoriels, eux-mêmes déclinés en objectifs sous-sectoriels. Ceux-ci s'accompagnent de l'élaboration d'un calendrier d'actions : par exemple le nombre de voitures électriques vendues chaque année, le nombre de GW éoliens ou PV supplémentaires chaque année pendant 5 ou 10 ans...

Ce calendrier d'objectifs sous-sectoriels doit permettre de définir un ensemble de politiques à même de les atteindre, mais également un dispositif de surveillance de ces politiques et de leur efficacité environnementale et économique. C'est pourquoi nous proposons que soient établis, pour chaque objectif sous-sectoriel et chaque calendrier d'action, des seuils d'alerte concernant :

- les performances environnementales des politiques (exprimés là aussi par exemple en nombre de véhicules électriques vendus ou en nombre de GW supplémentaires ENR chaque année) et
- les performances économiques permettant d'évaluer régulièrement des indicateurs, tels que par exemple l'impact passé et à venir de chaque politique au niveau budgétaire, pour l'Etat et pour les consommateurs.

La fixation du niveau pour chacun de ces seuils doit tenir compte du temps nécessaire au déploiement des politiques. Si ces seuils sont atteints, ceci doit donner lieu à une analyse des causes de ces sous-performances et mener soit à une adaptation de la politique, soit à une redéfinition plus profonde de la trajectoire de décarbonation, s'il est estimé que la poursuite de la politique ne pourrait que conduire à un échec.

Ces évaluations sous-sectorielles doivent déboucher sur une évaluation globale de la trajectoire, telle que la sécurité énergétique, la précarité énergétique, la compétitivité industrielle, le prix de l'énergie pour les consommateurs...

L'opérationnalisation d'une telle architecture devra faire l'objet de plus de recherches, notamment pour la définition des indicateurs, des seuils d'alerte. Ceci devrait être confronté notamment dans le cadre de stratégies réelles de pays. Ces différentes expériences nationales permettraient de créer des effets d'apprentissage croisés et de *spillover* de manière à consolider des processus d'ajustement dynamiques des trajectoires de décarbonation robustes qui pourraient servir de *benchmarks*. Ces questions de recherche sont d'un intérêt particulier suite à l'Accord de Paris, qui appelle tous les pays à surveiller la mise en œuvre de leurs contributions nationales et à revoir leur ambition régulièrement [1].

1.5. Bibliographie

Anadon L. D., Nemet G., Verdolini, E. (2013) The future costs of nuclear power using multiple expert elicitations: effects of RD&D and elicitation design, *Environmental Research Letters*, 8(3), 10 p.

Arditi M., et al. (2012) Quelle trajectoire pour atteindre le mix énergétique en 2025 ? Quels types de scénarios possibles à horizons 2030 et 2050, dans le respect des engagements climatiques de la France ? Rapport du groupe de travail n°2 du conseil national sur la transition énergétique. 72p.

Benbear L. S., Stavins, R. N. (2007). Second-best theory and the use of multiple policy instruments, *Environmental and Resource Economics*, 37(1), pp. 111-129.

Bezat J.-M. (2015) Nucléaire : la facture de l'EPR s'alourdit encore. Le nouveau réacteur de Flamanville devrait être mis en service fin 2018, *Le Monde*, 4 septembre 2015.

Blanchflower D.G., Oswald A.J. (1995) An introduction to the wage curve, *Journal of Economic Perspectives*, 9(3), pp. 153-167.

Blyth W., Bradley R., Bunn D., Clarke C., Wilson T., Yang M. (2007) Investment risks under uncertain climate change policy, *Energy policy*, 35(11), pp. 5766-5773.

Boccard N. (2014) The cost of nuclear electricity: France after Fukushima, *Energy Policy*, 66, pp. 450-461.

Brousseau E., Dedeurwaerdere T. (2012) Global Public Goods: the Participatory Governance Challenges". In : E. Brousseau, T. Dedeurwaerdere, B. Siebenhüner, eds. *Reflexive Governance and Global Public Goods*. Cambridge (MA): MIT Press, pp. 21-36.

Campoccia A., Dusonchet L., Telaretti E., Zizzo G. (2014) An analysis of feed'in tariffs for solar PV in six representative countries of the European Union, *Solar Energy*, 107, pp. 530-542.

Chai K. H., Yeo C. (2012) Overcoming energy efficiency barriers through systems approach—a conceptual framework, *Energy Policy*, 46, pp. 460-472.

Crassous R., Hourcade J. C., Sassi O. (2006) Endogenous structural change and climate targets modeling experiments with Imaclim-R, *Energy Journal*, pp. 259-276.

Dechezleprêtre A., Glachant M., Hašič I., Johnstone N., Ménière Y. (2011) Invention and transfer of climate change—mitigation technologies: a global analysis, *Review of Environmental Economics and Policy*, 5(1), pp. 109-130.

Dewey J. (1927) *The Public and its Problems*. Holt and Company, New York.

Deep Decarbonization Pathways Project (2015) *Pathways to deep decarbonization 2015 report*, SDSN - IDDRI.

Devine-Wright P. (2008), "Reconsidering public acceptance of renewable energy technologies: a critical review" in T. Jamasb, M. Grubb, M. Pollitt (Eds.), *Delivering a Low Carbon Electricity System: Technologies, Economics and Policy*, Department of Applied Economics Occasional Papers (No. 68) July 2008, Cambridge University Press.

Dorfman P, Prikken I, Burrall S. (2012), "Future national energy mix scenarios: public engagement processes in the EU and elsewhere", Final Report, European Economic and Social Committee, EESC/COMM/05/2012, pp. 1-65:

Edenhofer, O., Knopf, B., Leimbach, M., Bauer, N. (2010), (Eds) "**The Economics of Low Stabilization**", *The Energy Journal*, Volume 31 (Special Issue 1).

Eriksson L., Garvill J., Nordlund A.M. (2006) Acceptability of travel demand management measures: the importance of problem awareness, personal norm, freedom, and fairness, *Journal of Environmental Psychology*, 26, pp. 15-26.

Eriksson L., Garvill J., Nordlund A.M. (2008) Acceptability of single and combined transport policy measures: the importance of environmental and policy specific beliefs, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 42, pp. 1117-1128.

Escobar Rangel L., Lévêque F. (2015) Revisiting the Cost Escalation Curse of Nuclear Power Generation: New Lessons from the French Experience, *Economics of Energy and Environmental Policy*, 4, September.

Fischer C., Newell R. (2004), "Environmental and technology policies for climate change and renewable energy". Resources for the Future.

Garb Y., Pulver S., VanDeveer S.D. (2008) Scenarios in society, society in scenarios: toward a social scientific analysis of storyline-driven environmental modeling, *Environmental Research Letters*, 3, 8 p.

Giraudet L.-G., Guivarch C., Quirion P. (2012) Exploring the potential for energy conservation in French households through hybrid modelling, *Energy Economics*, 34(2), pp. 426-445.

Global CCS Institute (2013) The Global Status of CCS. Global Carbon Capture and Storage Institute Ltd., Canberra (Update January 2013).

Goulder L.H. (1995) Environmental taxation and the double dividend: a reader's guide, *Int. Tax Public Finance*, 2, pp. 157-183.

Grand D., Le Brun C., Vidil R. (2014) Transition énergétique et mix électrique : les énergies renouvelables peuvent-elles compenser une réduction du nucléaire ?, *Revue de l'énergie*, (619).

De Groot J., Schuitema G. (2012) How to make the unpopular popular? Policy characteristics, social norms and the acceptability of environmental policies, *Environmental Science & Policy*, 19-20, pp. 100-107.

Grubb M. (2014) Planetary economics: energy, climate change and the three domains of sustainable development. Routledge.

Guivarch C., Crassous R., Sassi O., Hallegatte . (2011) The costs of climate policies in a second-bestworld with labour market imperfections, *Climate Policy*, 11(1), pp. 768-788.

Haasnoot M., Kwakkel J. H., Walker W. E., Ter Maat, J. (2013) Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world. *Global Environmental Change*, 23(2), pp. 485-498.

Hassler J., Kruselly P., Olovsson C. (2012) Energy-Saving Technical Change. NBER Working Paper n° 18456. <http://www.nber.org/papers/w18456>

Holling C.S. (1978) Adaptive Environmental Assessment and Management. John Wiley & Sons, New York.

Hulme M., Dessai S (2008) Predicting, deciding, learning: can one evaluate the 'success' of national climate scenarios?" *Environmental Research Letters*, 3.

Hulse, D., Branscomb W.A., Payne S.G. (2004), "Envisioning Alternatives: Using Citizen Guidance to Map Future Land and Water Use." *Ecological Applications* 14, no. 2: 325–341.

Jaffe A. B., Stavins R. N. (1994) The energy-efficiency gap What does it mean?, *Energy policy*, 22(10), pp. 804-810.

Johnstone N., Haščič I., Popp D. (2010) Renewable energy policies and technological innovation: evidence based on patent counts, *Environmental and Resource Economics*, 45(1), pp. 133-155.

Joireman J.A., Lasane T.P., Bennett J., Richards D., Solaimani S. (2001) Integrating social value orientation and the consideration of future consequences within the extended norm activation model of proenvironmental behaviour, *British Journal of Social Psychology*, 40, pp. 133-155.

Kern F., Gaede J., Meadowcroft J., Watson J. (2016) The political economy of carbon capture and storage: An analysis of two demonstration projects, *Technological Forecasting and Social Change*, 102, pp. 250-260.

Knopf B., Edenhofer O., Flachsland Chr., Kok M.T.J., Lotze-Campen H., Luderer G., Popp A., van Vuuren D.P. (2010), "Managing the low-carbon transition – from model results to policies". *The Energy Journal*, Volume 31 (Special Issue 1). The Economics of Low Stabilization.

Kwakkel J. H., Haasnoot M., Walker W. E. (2015) Developing dynamic adaptive policy pathways: a computer-assisted approach for developing adaptive strategies for a deeply uncertain world, *Climatic Change*, 132(3), pp. 373-386.

Lecuyer O., Quirion P. (2013), "Can Uncertainty Justify Overlapping Policy Instruments to Mitigate Emissions ?" *Ecological Economics*. 93 : 177-191

Lee K. (1993) *Compass and Gyroscope: Integrating Science and Politics for the Environment*. Island Press, Washington.

Lempert R. J., Schlesinger M. E. (2000). Robust strategies for abating climate change. *Climatic Change*, 45(3), 387-401.

Marcantonini C., Ellerman A. D. (2015) The implicit carbon price of renewable energy incentives in Germany, accepted for publication in *Energy Journal*. Previous version published in EUI working paper, 2014/28.

Marcantonini C., Valero V. (2015) Renewable Energy Incentives and Co2 Abatement in Italy. Robert Schuman Centre for Advanced Studies Research Paper No. RSCAS 2015/20.

Mathy S., Fink M., Bibas R. (2011), "Quel rôle pour les scénarios Facteur 4 dans la construction de la décision publique ? *Développement Durable et territoires*, 2011, 2 (1), pp. 1-22

McLain R.J., Lee R.G. (1996) Adaptive management: promises and pitfalls, *Environmental Management*, 20, pp. 437-448.

MEDDE (Ministère de l'Environnement, du Développement Durable et de l'Énergie) (2015) Loi relative à la Transition Énergétique pour la Croissance verte. <http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Projet-de-loi-.html>

O'Neill B C, Pulver S, VanDeveer S, Garb Y (2008) Where next with global environmental scenarios? An introduction and overview, *Environmental Research Letters*, 3.

O'Neill B.C., Nakicenovic N. (2008) Learning from global emissions scenarios, *Environmental Research Letters*, 3.

Pahl-Wostl C., Sendzimir J., Jeffrey P., Aerts J., Berkamp G., Cross K. (2007) Managing change towards adaptive water management through social learning, *Ecology and Society*, 12(30).

Parson E. A., Karwat D. (2011) Sequential climate change policy. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(5), pp. 744-756.

Patel M., Kok K., Rothman D.S. (2007), "Participatory Scenario Construction in Land Use Analysis: An Insight into the Experiences Created by Stakeholder Involvement in the Northern Mediterranean." *Land Use Policy* 24, no. 3: 546–561.

Quinet A. (2009) La valeur tutélaire du carbone Rapport de la commission présidée par Alain Quinet. La Documentation française, Rapport n°16, 424 p.

Reddy A. K. (1991) Barriers to improvements in energy efficiency, *Energy Policy*, 19(10), pp. 953-961.

Renn O. (1999), "A Model for an Analytic-Deliberative Process in Risk Management". *Environ. Sci. Technol.*, 33 (18), 3049 -3055, 1999. 10.1021/es981283m S0013-936X(98)01283-8

Rosenhead J. (1990) Rational analysis: keeping your options open. In : J. Rosenhead, J. Mingers (eds.), *Rational Analysis for a Problematic World: Problem Structuring Methods for Complexity, Uncertainty and Conflict*. John Wiley & Sons, Chichester.

Schleich J., Gruber E. (2008) Beyond case studies: Barriers to energy efficiency in commerce and the services sector, *Energy Economics*, 30(2), pp. 449-464.

Schuitema G., Steg L., van Kruining M. (2011) When are transport pricing policies fair and acceptable, *Social Justice Research*, 24, pp. 66-84.

Steg L., Dreijerink L., Abrahamse W. (2005), "Factors influencing the acceptability of energy policies: A test of VBN theory". *Journal of Environmental Psychology*, 25(4), 415-425.

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

Solow R. (2000) Toward a macroeconomics of the medium run, *Journal of Economic Perspectives*, 14(1), pp. 151-158.

Van Asselt M., Rijkens-Klomp N. (2002), "A Look in the Mirror: Reflection on Participation in Integrated Assessment from a Methodological Perspective." *Global Environmental Change* 12, no. 3: 167–184.

Wagner A. (2014) Residual demand modeling and application to electricity pricing, *Energy Journal*, 35(2), pp. 45-73.

Walker W. E., Rahman S. A., Cave J. (2001) Adaptive policies, policy analysis, and policy-making, *European journal of operational Research*, 128(2), pp. 282-289.

Waisman H., Guivarch C., Lecocq F. (2012) The transportation sector and low-carbon growth pathways, *Climate Policy*, 13(1), pp. 107-130.

Whitmarsh L., O'Neill S., Lorenzoni I. (2011), "Engaging the Public with Climate Change: Behaviour Change and Communication". Earthscan, London.

Wilcox D. (2003), *The Guide to Effective Participation*. Partnership Books, Brighton.

Wilkinson A., Eidinow E. (2008) Comparing scenarios for global environmental assessment with scenarios in organizational settings, *Environmental Research Letters*, 3.

Yang M., Blyth W., Bradley R., Bunn D., Clarke C., Wilson T. (2008) Evaluating the power investment options with uncertainty in climate policy, *Energy Economics*, 30(4), pp. 1933-1950.

II. Pour des stratégies de lutte contre le changement climatique intégrées dans les politiques de développement

Parallèlement à ces travaux de dimensions à la fois sectorielle et macroéconomique pour la France, mes travaux de recherche sur l'engagement des PED dans les politiques climatiques – soit le thème de ma thèse soutenue en 2004 – se sont articulés autour de l'élaboration d'une réponse alternative à celle d'une architecture *top-down* englobant tous les gaz, tous les secteurs et tous les pays, et fondée sur un marché global de quotas d'émissions de GES révélant un prix international unique. Plusieurs de mes travaux montrent les limites de cette approche et débouchent sur des propositions d'un changement de paradigme permettant de construire un régime climatique international assurant la réconciliation des politiques climatiques et des politiques de développement.

II.1. Kyoto ou l'histoire d'un malentendu ?

Le système de coordination qui a émergé à Kyoto est un cas paradoxal du point de vue de la théorie économique concernant le financement des biens publics (Samuelson, 1954), dont le climat est un exemple par excellence. Les concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre sont le résultat d'actions combinées de tous les pays et sont de ce fait assimilables à un bien public : si un pays prend des mesures de réduction des gaz à effet de serre, tous les pays en bénéficieront, et inversement, si un pays augmente ses émissions, tous en pâtiront. Cependant, une action unilatérale n'aurait qu'un impact marginal et non significatif sur le stock d'émissions. Ceci conduit à la nécessité de mener une action coordonnée ; se pose alors la question de la répartition équitable des efforts pour la gestion du bien public produit de manière décentralisée. Pour maximiser l'utilité collective, et sous contrainte conservatrice interdisant des redistributions préalables de revenus entre nations (Chichilnisky *et al.*, 2000), elle devrait se faire au prorata de l'utilité marginale des revenus des pays (Bowen, 1943) ; Lindahl, 1919) ; Samuelson, 1954). Un Américain disposant d'un revenu moyen X fois supérieur à celui d'un Indien devrait alors payer X fois plus que celui-ci. La leçon de ce théorème simple est qu'un prix unique du carbone est inéquitable, sauf si sont mis en œuvre des transferts compensatoires vers les pays du Sud, résultant d'autres mesures complémentaires.

Il existe plusieurs instruments économiques permettant d'atteindre ce résultat théorique :

- Une taxation différenciée (équilibre de Lindahl). Mais comme l'atmosphère est un bien public produit de manière privée décentralisée, une telle solution conduirait à une distribution non efficace des coûts de réduction: les Etats-Unis pourraient utiliser des technologies de réduction X fois plus coûteuses que les technologies indiennes par exemple ;
- Des systèmes organisés autour d'un prix unique:

- Une taxe uniforme couplée avec la mise en place de transferts de compensation pour assurer l'obtention d'un optimum de Pareto ;
- L'attribution de quotas d'émission conduisant à la mise en place d'un système de permis d'émissions négociables (PEN), en accord avec un partage équitable des coûts.

C'est pourtant autour de la ligne directrice d'un prix unique du carbone que l'expertise économique, mobilisée sur ces questions, a convergé, l'idée étant de minimiser le coût global du respect d'un objectif donné de réduction des émissions en égalisant les coûts marginaux de réduction des émissions entre pays et secteurs.

II.1.1. Le système de permis d'émissions négociables au risque de la dimension d'équité [13][15]

La préparation de l'après Kyoto visant à élargir le système de PEN à l'ensemble des pays, de l'Annexe I et non Annexe I, vit se multiplier les propositions pour l'élaboration de règles d'allocation des quotas, chacune porteuse d'une vision du concept de justice. Deux règles « polaires » de la représentation du concept d'équité basées sur des critères objectivables ont délimité le débat. La première est l'allocation selon des droits acquis, *grandfathering* en anglais, consistant à définir des objectifs de réduction en pourcentage par rapport aux émissions d'une année de base donnée. Elle vise, entre autres, à ne pas devoir mettre au rebus le capital technique et les infrastructures existants. Cette règle est favorable aux pays développés. A l'opposé, l'allocation du même droit d'émission par habitant (Agarwal, A., Narain, S., 1991) est devenue une revendication centrale du G77. Différentes propositions intermédiaires (Phylipsen *et al.*, 1998 ; Meyer, 2000 ; den Elzen *et al.*, 1999) ont visé des formes de compromis entre ces deux règles.

Le raisonnement en terme de justice conséquentialiste, c'est-à-dire en fonction de la distribution attendue du fardeau pour une règle donnée, permet de clarifier les termes mais pas de résoudre la difficulté, puisqu'il y a plusieurs métriques envisageables pour juger du fardeau :

- Le prix du carbone émanant du système de permis d'émissions négociables et son impact sur le prix de l'énergie : dans un scénario idéal, un prix du carbone sera relayé par une taxe sur les énergies fossiles qui, étant donné l'éloignement des économies en développement d'un équilibre compétitif, a peu de chances d'être efficace.
- Les effets en bien-être, une fois pris en compte les effets d'équilibre général : ils dépendent des conditions préexistantes dans chacun des pays et, dans le cas d'une taxe, l'ampleur du double dividende obtenu sera fonction du mode de recyclage de son produit au sein de l'économie nationale, ou dans le cas de quotas, du mode d'allocation des permis (gratuits ou

aux enchères) qui aura un impact différencié en terme de signal-prix envers les consommateurs.

- Les effets de richesse : sous son unicité apparente, le prix du carbone (égal au coût de réduction marginal de la dernière tonne de carbone réduite) sera ressenti de manière inversement proportionnelle au revenu par tête dans chacun des pays ; juger de l'impact sur les niveaux d'utilité nécessite un ajustement du prix selon les niveaux de revenu par tête des pays (25 fois plus bas en Afrique qu'aux Etats-Unis par exemple). Un Américain devrait alors contribuer autant de fois plus qu'un Africain aux efforts de réduction. Autrement dit, l'égalisation des coûts techniques n'est optimale qu'accompagnée d'importants mécanismes de compensation.
- L'impact sur la compétitivité industrielle, notamment pour les pays dont l'économie repose sur l'industrie lourde et qui seraient fortement pénalisés par un système de prix différenciés. C'est d'ailleurs une des raisons majeures qui ont conduit à la décision d'axer le système de coordination internationale sur un signal prix unique en raison de la prégnance des craintes concernant les risques de distorsion liés à la concurrence internationale.
- Les transferts opérés par les échanges de permis peuvent être très importants et dépasser le niveau des investissements directs à l'étranger. Leur montant est à mettre en balance avec le surcoût énergétique. Leur recyclage au sein de l'économie dépendra des structures technico-économiques (modes de production intensifs ou non en capital) préexistantes. Leur répartition pose également des problèmes d'ordre géopolitique, notamment dans le cas d'une forte polarisation de ceux-ci vers seulement quelques pays.

L'approche consistant à traiter l'équité par des allocations favorables au Sud conduirait donc à des transferts de paiement peu réalistes ce qui représente sans doute le principal point de faiblesse d'un dispositif de permis d'émissions négociables.

Les nombreux exercices de quantification qui ont été effectués (Höhne *et al.*, 2014) montrent la difficulté de choisir un critère de sélection de la règle sur laquelle tous les pays puissent s'accorder. La prise en compte des dommages, peu présente tant qu'on raisonnait dans le cadre d'un effet de démonstration à la charge des pays industrialisés, rajoute un niveau additionnel de difficulté. C'est pourquoi on ne pourra sortir de cette contradiction que si l'on renonce à fonder les règles d'allocation des quotas sur des règles explicites d'équité (Ashton et Wang, 2003). Cela ne signifie pas pour autant que l'on n'ait pas besoin d'un accord sur un attracteur de long terme, et celui-ci ne peut être que centré sur l'idée d'une certaine convergence des émissions par tête. Mais une chose est de l'utiliser pour établir une base à partir de laquelle engager les discussions de façon à déboucher sur un compromis jugé « équitable » par les Parties, une autre est de prétendre le fonder sur des principes d'équité. Les

deux articles publiés en 2002 et 2003 ([\[13\]](#) et [\[15\]](#)) trouvent un écho particulier dans le contexte de coordination internationale hérité de l'échec de la Conférence de Copenhague et après l'Accord de Paris fin 2015.

II.1.2. Les gains incertains du mécanisme de développement propre (MDP) [\[14\]](#) [\[16\]](#) [\[23\]](#) [\[29\]](#) [\[30\]](#)

Le MDP, mécanisme-projet créé par le protocole de Kyoto dans son article 12, peut constituer un élément de réponse par l'effet incitatif qu'il peut avoir sur la mise en place de politiques domestiques vertueuses pour le climat et porteuses de développement comme décrit dans [\[14\]](#). Cet effet incitatif permet d'appréhender l'effet-levier potentiel du MDP sur le développement du pays (défini comme le rapport du revenu généré par les investissements additionnels du MDP dans le pays hôte et la valeur des crédits de réduction des projets MDP) [\[16\]](#).

Le potentiel pour cet effet levier réside dans la coexistence de trois types de bénéfices engendrés par une telle articulation : le revenu des crédits d'émission, le bénéfice commercial normal des projets et la contribution de ces projets aux objectifs des politiques publiques de développement. Il est alors possible de représenter l'articulation entre le niveau microéconomique de la décision concernant un investissement industriel unique et l'accroissement du flux global d'investissement et de revenus suscité par l'ensemble des projets MDP au sein d'une économie nationale. L'application de cette formalisation au secteur électrique indien, menée en collaboration avec l'équipe du professeur Shukla de l'Indian Institute of Management d'Ahmedabad, où j'ai séjourné, montre que l'effet de levier est significatif et que l'intérêt économique du MDP pour le pays hôte va très au-delà d'un partage de la valeur des crédits avec les investisseurs du Nord que le MDP permet d'attirer²².

Malgré ces résultats encourageants, des limites inhérentes à la nature du mécanisme – au centre desquelles les coûts de transaction nécessaires pour assurer l'intégrité environnementale du mécanisme (voir projets de recherche pages 16 et 19) – conduisent à mettre en doute sa capacité à constituer l'instrument central pour engager de manière structurante les économies en développement dans des modes de développement bas carbone. En effet, au-delà des problèmes liés à la répartition géographique des projets identifiée dans la littérature, la recherche à tout prix d'une intégrité environnementale exemplaire limite la portée du mécanisme et conduit à soulever deux types de question :

²² Ce travail s'est appuyé sur une quantification de l'effet levier du MDP sur l'économie du pays hôte réalisée avec le modèle MARKAL Inde du système énergétique indien.

- celles relatives à la construction des scénarios de référence dans un contexte de déficit de développement qui va de pair avec une situation dans laquelle il est difficile de construire un scénario de référence émetteur de GES qui permettrait de valoriser des réductions d'émissions avec des crédits de réduction des émissions dans le cadre du MDP. Ceci nécessite la construction de scénarios contrefactuels qui s'allient mal à la recherche d'une intégrité environnementale stricte où chaque crédit de réduction des émissions doit correspondre à une tonne de carbone effectivement non émise.
- celles relatives aux projets visant l'amélioration des usages finaux diffus des ménages dans le résidentiel ou les transports, notamment pour l'amélioration de l'efficacité énergétique.

II.2. Le nœud gordien climat-développement

Le choix d'axer un régime climatique qui s'appliquerait aux pays en développement autour d'un prix unique du carbone rencontre de nombreuses impasses. C'est pourquoi nous proposons de repartir des réalités des pays en développement, de manière à proposer des éléments de réorientation pour définir un régime climatique international.

II.2.1. Les sous-optimalités des scénarios de référence [9]

Les scénarios de référence jouent un rôle central dans les messages envoyés aux décideurs publics pour la définition des actions de réduction des émissions de GES. Pourtant, à la fin des années 2000, Raupach *et al.* (2008) et Sheehan (2008) attiraient l'attention sur le fait que les émissions de GES avaient augmenté plus rapidement que prévu dans l'ensemble des scénarios SRES (GIEC, 2000). Au même moment, Pielke *et al.* (2008) mettaient en doute l'optimisme d'une décarbonation automatique des économies qui existent dans certains scénarios de référence existants (les scénarios SRES notamment). Cet optimisme tendrait alors à sous-estimer le défi que représente l'atténuation du changement climatique.

Treize années plus tôt, Shukla (1995) alertait déjà sur le fait que la plupart des modèles utilisés pour éclairer le débat sur les instruments économiques à mettre en œuvre dans le cadre d'un régime climatique international et qui viserait à inclure les PED, négligeaient certaines caractéristiques, telles que des pénuries d'approvisionnement, les mauvaises performances du secteur de l'énergie, le changement structurel économique, les dualités entre urbain et rural, les biocarburants traditionnels. Insistait donc sur le caractère très sous-optimal de la situation initiale et des projections de référence. D'autres auteurs, comme Urban *et al.* (2007) et Van Ruijven *et al.* (2008), renvoient également à la pertinence des méthodes utilisées dans les modèles de projection de la demande d'énergie pour représenter les spécificités des systèmes énergétiques des pays en développement.

Dans l'article publié en 2012 dans *Climatic Change*, nous montrons dans quelle mesure la prise en compte des sous-optimalités d'une économie conduit à réévaluer les perspectives de baisse de l'intensité énergétique, ce qui tend à redéfinir les potentiels de décarbonation. Le modèle Imaclim-R Monde est utilisé et le cas de l'Inde illustre le propos. En effet, l'accès à l'énergie en Inde est emblématique d'un secteur énergétique fortement sous-optimal avec de fortes défaillances de marchés et institutionnelles. Seuls 75 % de la population ont accès à l'électricité. Des subventions tarifaires croisées – justifiées pour des raisons de droit à l'accès à l'énergie pour les ménages et le secteur agricole – ne permettent pas un recouvrement des coûts de production. Ceci donne lieu à un sous-investissement chronique dans des capacités de production et de transport et distribution ou encore de maintenance, et se traduit par un système électrique extrêmement peu efficace, avec des coupures de courant récurrentes.

La représentation spécifique de ces barrières (contrainte en capital et recalibration des rendements énergétiques des modes de production d'électricité et du niveau de pertes sur le réseau électrique, déficit de capacité de production entraînant des coupures de courant et une surutilisation des capacités existantes²³) est intégrée dans le modèle Imaclim-R Monde. Trois scénarios sont réalisés : un scénario INV+ avec allègement de la contrainte sur les investissements dans le secteur électrique, un scénario INV- avec perpétuation d'une forte contrainte sur les investissements dans le secteur électrique et un scénario médian. Ces trois scénarios montrent que la contrainte en capital pesant sur le secteur électrique peut grever le développement économique indien, tout en maintenant le secteur électrique dans un *lock-in* technologique fortement carboné et exposant l'économie indienne aux risques inhérents à la hausse du prix du pétrole. Les simulations montrent (Tableau 9 et

Tableau 10) que la prise en compte de ces sous-optimalités conduit à des perspectives de baisse de l'intensité énergétique bien moindres que les projections d'organismes internationaux ou occidentaux (le *World Energy Outlook* de l'AIE, ou l'*International Energy Outlook* de l'US Energy Information Administration), mais plus proches des projections menées par des experts indiens (étude *Integrated Energy Policy* - IEP de Parikh *et al.*, 2006)

²³ Dans Imaclim-R Monde, les producteurs doivent faire face aux contraintes de court terme, notamment des coefficients input-output fixes. Ainsi la seule marge de manœuvre dont disposent les producteurs réside dans le taux d'utilisation des capacités de production. Néanmoins, un taux d'utilisation des capacités proche de 1 entraîne des surcoûts de production qui traduisent par exemple un coût du travail plus élevé (heures supplémentaires, travail de nuit, davantage de maintenance...).

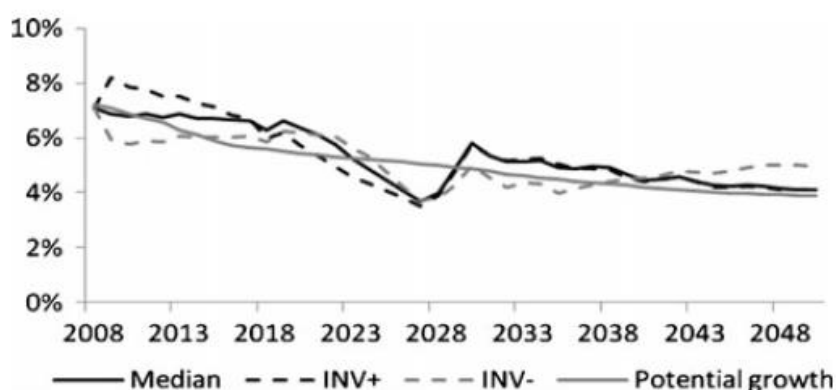
TABLEAU 9: DECOUPLAGE ENTRE CROISSANCE ECONOMIQUE ET CROISSANCE DE LA CONSOMMATION D'ENERGIE PRIMAIRE. COMPARAISON ENTRE LES TENDANCES HISTORIQUES, ET LES PROJECTIONS D'ETUDES INTERNATIONALES (WEO ET IEO) ET D'EXPERTS INDIENS (ETUDE IEP DE PARICK ET AL., 2006).

		1995-2005	2005-2015	2015-2030
Historical trends		0,75		
International organisations	WEO		0,44-0,51	0,57-0,6
	IEO		0,36-0,7	0,49-0,52
Indian Experts	IEP Falling elasticities		0,72	0,68
	IEP Constant elasticities		0,8	0,8

TABLEAU 10 : ELASTICITE DE LA CONSOMMATION D'ENERGIE PRIMAIRE A LA CROISSANCE DU PIB ET TAUX DE CROISSANCE DU PIB DANS LES SIMULATIONS IMACLIM-R MONDE

		2008-2015	2015-2030	2030-2050
INV+ avec allègement de la contrainte sur les investissements dans le secteur électrique	Elasticité	0,73	0,66	0,65
	Taux de croissance	7,6%	5,1%	4,6%
INV- avec perpétuation d'une forte contrainte sur les investissements dans le secteur électrique	Elasticité	0,64	0,75	0,78
	Taux de croissance	5,9%	5,3%	4,6%

FIGURE 12: TAUX DE CROISSANCE ECONOMIQUE EN INDE DANS LES 3 SCENARIOS REALISES AVEC IMACLIM-R MONDE ²⁴



²⁴ IMACLIM - R repose sur des hypothèses exogènes pour la croissance de la productivité du travail et de la population active, dont la somme détermine les taux de croissance potentielle (Solow, 1956). Elle représente la croissance du PIB qui serait réalisée si le chômage et la structure de l'économie restaient constants. Pour l'Inde, la croissance potentielle diminue de 7,2 % à 3,9 % en 2050. Les taux de croissance économique endogènes peuvent être différents de ce taux en fonction des évolutions du chômage et de la répartition du travail entre les régions et les secteurs. Ces évolutions sont limitées par les ressources financières disponibles pour les

La première caractéristique du scénario de référence obtenu avec Imacsim-R montre la persistance sur le long terme des sous-optimalités dans le secteur électrique. La pénurie d'électricité persiste du fait des contraintes d'investissement et de la surutilisation des capacités de production qui conduisent à d'importants surcoûts de production, pouvant atteindre 15 %. En conséquence, le secteur industriel se reporte sur des générateurs diesel pour compenser les défaillances de la production centralisée. Ceci limite les possibilités de substitution énergétique et d'amélioration de l'efficacité énergétique et de trajectoire bas carbone, et contraint en particulier l'activité industrielle.

La seconde caractéristique est la dépendance de l'Inde aux importations d'énergies fossiles, notamment de pétrole. Les défaillances du secteur électrique, en limitant les possibilités de substitution vers le secteur électrique, renforcent la dépendance au pétrole. Le résultat est une forte vulnérabilité de l'Inde à des prix élevés du pétrole ; les importations pétrolières pourraient représenter alors jusqu'à 10 % du PIB dans les années 2030 dans l'hypothèse d'un *peak oil* ou d'un choc de prix à cette date. L'interaction entre un déficit structurel de capacité de production dans le secteur électrique et des prix du pétrole élevés conduit à une croissance économique qui décroît significativement (de 5,7 % en 2019 à 3,8 % en 2027) en cas de prix du pétrole élevés.

II.2.2. La prise en compte des imperfections de marché et situations de second rang dans la définition des politiques climatiques [11]

Une solution est alors de faire en sorte que les politiques climatiques visent d'abord la résorption des sous-optimalités existantes. Là aussi l'Inde illustre notre propos. Au-delà du scénario de référence décrit ci-dessus, nous simulons trois scénarios correspondant chacun à un objectif mondial de stabilisation de la concentration en CO₂ à 450 ppm :

- Simulation 1 : un prix uniforme du carbone déterminé de manière endogène au modèle ;
- Simulation 2 : un système de quotas échangeables avec des allocations suivant une règle de contraction et convergence en 2100 – CC2100²⁵ (Meyer, 2000). Les quotas sont mis aux enchères ;
- Simulation 3 : un système identique à la simulation 2 + introduction de politiques domestiques visant à résorber les défaillances du secteur électrique : suppression des subventions aux consommations d'électricité pour le secteur agricole, accompagnée de mesures de maîtrise de

investissements et à court terme par les rigidités comme l'inertie du stock de capital et les frictions dans la réaffectation du travail ou les rigidités sur les salaires.

²⁵ La proposition d'allouer les quotas sur la base d'un principe de contraction et convergence consiste à réduire les émissions globales de GES jusqu'à un niveau de sécurité (contraction) en faisant converger les émissions per capita de chaque pays vers un niveau qui serait identique pour tous les pays à un horizon donné. Cette règle est un compromis entre du *grandfathering* sur du court terme et du per capita à l'horizon de convergence (ici 2100).

la demande d'énergie dans le secteur agricole + Programme pour réduire les pertes commerciales et techniques de transmission et distribution.

Dans ces scénarios, les revenus de la taxe carbone ou de la mise aux enchères sont soit reversés de manière forfaitaire aux ménages, soit ils servent à compenser la baisse de la fiscalité sur le travail. Les résultats ne sont décrits que dans le premier cas.

L'objectif de stabilisation conduit à des prix du carbone semblables dans les 3 simulations augmentant linéairement jusqu'en 2040 à 80 €/tCO₂, puis décroissant légèrement à 65 €/tCO₂ en 2050. Ces valeurs sont en cohérence avec les fourchettes de prix du carbone (entre 30 et 150 €/tCO₂) issues des études analysant un tel objectif de stabilisation (GIEC, 2007).

L'application d'un prix unique du carbone comme seul instrument (simulation 1) pour atteindre cet objectif conduit en Inde à des pertes économiques importantes qui résultent de la combinaison (Figure 13) :

- de baisses de la consommation à cause d'un effet prix lié à l'augmentation du budget dédié aux services énergétiques et d'un effet revenu, puisque les transferts forfaitaires des revenus de la taxe ne compensent pas la perte d'activité et des niveaux inférieurs de salaires ;
- de pertes liées au commerce international du fait d'un effet négatif de l'introduction de la taxe sur l'indice de compétitivité internationale indienne, dû à la plus grande part des coûts énergétiques dans les coûts de production tirés à la hausse par les sous-optimalités et les faibles performances du secteur énergétique ;
- enfin de diminutions du niveau d'investissement sous l'effet de la baisse de l'activité économique.

Néanmoins, même si elles sont importantes notamment vers 2030, date à laquelle elles culminent, ces pertes restent transitoires du fait du progrès technique induit par la taxe.

La simulation 2 (Figure 14) permet d'évaluer l'impact des transferts de quotas dans le cadre d'une règle d'allocation CC2100. La règle CC2100 permet à l'Inde d'être exportatrice nette de quotas tout au long de la période et les transferts financiers qu'elle reçoit représentent jusqu'à 2,6 % de son PIB. Malgré ces transferts importants, les pertes économiques (6 % en moyenne) restent significatives durant les 15 premières années. Deux éléments liés aux flux de capitaux expliquent la différence avec la simulation 1 : (i) l'effet revenu des transferts de quotas et (ii) la balance commerciale et l'appréciation du taux de change indien qui favorise les importations de produits et pénalise les exportations indiennes, renvoyant ainsi au phénomène de *dutch disease* (Sachs et Warner, 2001). Néanmoins par la suite, la croissance économique est plus rapide que dans le scénario de référence. Les pertes

macroéconomiques de transition sont importantes pendant la période où la règle d'allocation de quotas reste peu favorable à l'Inde (puisque durant les premières années, la règle CC2100 est proche d'une règle *grandfathering*), mais c'est une période durant laquelle également le prix du carbone est encore faible.

Enfin, dans la dernière simulation, les pertes macroéconomiques par rapport au scénario de référence sont limitées aux trois premières années et au maximum à 2 %. Les politiques et mesures domestiques permettent en effet de diminuer le prix de l'électricité du fait de l'amélioration des performances énergétiques et financières du secteur, ce qui améliore les coûts de production et donc la compétitivité industrielle mais aussi le budget des ménages.

FIGURE 13 : VARIATION DE PIB ET DECOMPOSITION DE LA VARIATION PAR RAPPORT AU SCENARIO DE REFERENCE POUR LA SIMULATION AVEC LA TAXE CARBONE SEULE (SIMULATION 1)

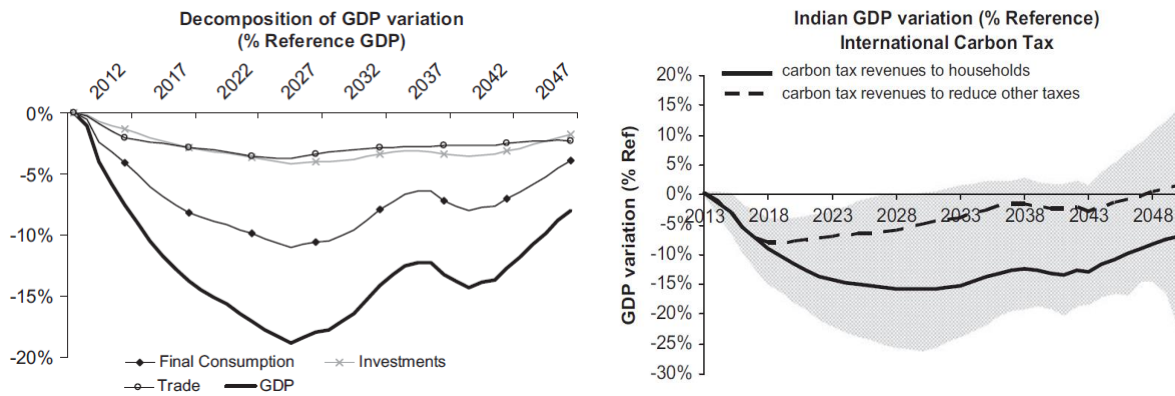
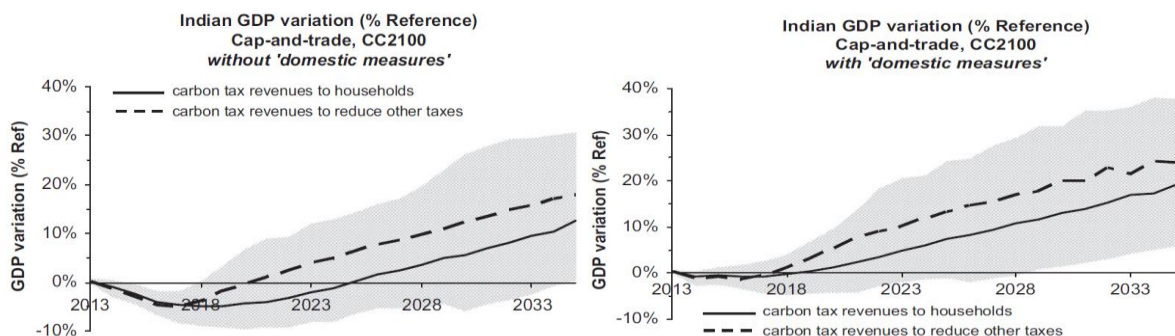


FIGURE 14: VARIATION DE PIB ET DECOMPOSITION DE LA VARIATION PAR RAPPORT AU SCENARIO DE REFERENCE POUR LA SIMULATION 2 AVEC QUOTAS ET SIMULATION 3 AVEC QUOTAS ET POLITIQUES DOMESTIQUES



L'ensemble de ces résultats est confirmé par un ensemble de tests de robustesse prenant en compte une analyse de sensibilité (décrite par les zones grisées dans la Figure 13 et la Figure 14).

Les conclusions que l'on peut tirer de cet exercice sont que l'intégration des spécificités du secteur énergétique dans le modèle Imaclim-R Monde montre qu'une politique climatique optimale pour l'Inde n'est pas un prix du carbone, car les coûts macroéconomiques encourus sont très élevés. L'adjonction à un prix du carbone de politiques domestiques visant à réduire les sous-optimalités (réforme tarifaire dans le cas de l'électricité, mesures de maîtrise de la demande d'énergie et d'efficacité énergétique) permet de réduire l'ampleur et la durée des pertes macroéconomiques en Inde suivant l'introduction d'un prix du carbone.

Deux messages importants peuvent être tirés de cette analyse :

- D'un point de vue méthodologique, cette approche milite pour la représentation des mécanismes de second rang et des spécificités nationales dans les travaux de scénarisation et les architectures de modélisation utilisées pour l'évaluation des politiques climatiques.
- D'un point de vue politique, les résultats montrent les synergies potentielles entre des politiques domestiques répondant à des priorités de développement telles que l'accès à l'énergie, et notamment à l'électricité et la limitation des émissions de GES.

II.3. Un menu d'engagements plutôt qu'un prix unique

Ainsi, pour reprendre les différents points évoqués dans ce qui précède, nous identifions un certain nombre d'obstacles inhérents à un mode de coordination pour les PED organisé autour du concept de prix unique du carbone :

- (i) l'application d'un signal prix unique dans un monde réel dominé par les sous-optimalités (marchés incomplets et fragmentés, économies duales, gouvernance faible...) peuvent avoir des impacts contraires à l'objectif recherché ; par exemple l'imposition d'un signal prix sur le carbone dans une économie dominée par des formes d'énergie traditionnelles, non commerciales et polluantes peut conduire à leur renforcement ;
- (ii) l'incertitude sur les gains pour les PED des transferts financiers potentiellement engendrés par un système de quota ;
- (iii) l'impossibilité d'élaborer des règles de partage des réductions d'émission sur la base de principes d'équité par essence controversés allant d'un principe de *grandfathering* soutenu par les pays industrialisés à l'autre extrême, un principe d'allocation par tête soutenu par les pays en développement, en passant par différentes propositions intermédiaires telles que le mécanisme de contraction et convergence ;

- (iv) l'impossibilité d'établir des systèmes de comptabilisation stricte des réductions d'émissions par rapport à un scénario de référence contrefactuel dans un contexte de dynamique de développement ;
- (v) l'incertitude sur l'effet levier du MDP sur le développement et sur la mise en œuvre de politiques de développement et les difficultés pour assurer son intégrité environnementale.

II.3.1. Redéfinir le paradigme du régime climatique au travers d'une architecture minimale [20] [21] [22] [28]

C'est pourquoi nous proposons, dans une approche plus adaptée aux réalités des pays en développement (nombreuses défaillances de marchés et distorsions, rareté ou mauvaise allocation du capital, besoins en infrastructures, gains incertains pour le développement endogène de la libéralisation du commerce international, tensions renouvelées sur la sécurité énergétique) prenant le contre-pied des approches *top-down*, de montrer dans quelle mesure la mise en œuvre de politiques climatiques dans les PED pourrait contribuer à lever les blocages à la mise en œuvre de politiques de développement dans des domaines tels que les besoins d'investissement en infrastructure, la sécurité énergétique ou la recherche d'un développement endogène.

Dans ce contexte, nous réexaminons de manière critique les réflexions menées en amont puis en aval du sommet de Copenhague fin 2009 (et donc à l'occasion des discussions autour de l'élargissement du système de permis d'émissions négociable à l'ensemble des parties à la négociation) les fondements pour une architecture minimale de coordination :

1. *une trajectoire de référence du prix du carbone à long terme comme élément de coordination d'une diversité de politiques vertueuses pour le climat (y compris des réformes fiscales)* : le seul prix du carbone ne suffira pas à impulser la décarbonation dans tous les pans de l'économie et des systèmes techniques. Il n'agira pas sur de nombreux *drivers* tels que le coût en capital, les primes d'assurance, la structure des systèmes fiscaux ou encore le développement de technologies alternatives. La problématique doit être inversée : les prix à long terme du carbone doivent constituer une référence pour évaluer les bénéfices climatiques de toute forme d'initiative sur le terrain. La première implication est de ne pas exiger au nom de l'intégrité environnementale qu'une tonne de carbone évitée soit dûment mesurée pour être créditée, surtout lorsque les potentiels de gains sont inférieurs à l'incertitude de la mesure. Ceci reflète le fait que des réductions non mesurables, induites par exemple par une limitation de vitesse, ne pourraient être échangées entre Etats, mais participeraient néanmoins à la dynamique du marché du carbone en réduisant les importations ou en augmentant les

exportations du pays mettant en œuvre ces mesures. Dans le cadre d'un système international de quotas, les gouvernements restent les acteurs clés du système puisqu'ils maîtrisent non seulement les objectifs de réduction, mais aussi le nombre de secteurs auxquels les allocations sont distribuées et leur degré d'intervention sur le marché international.

2. *des engagements de réductions de formes différentes et non contraignants, des safety-valves pour répondre aux incertitudes sur les prix, des accords volontaires dans certains secteurs industriels, un MDP réformé pour réorienter les investissements et programmes d'infrastructures vers des modes de développement sobres en carbone.* Le problème inhérent à l'aspect non contraignant de tels engagements est bien sûr de ne pouvoir garantir l'atteinte d'un objectif environnemental. Néanmoins, l'alternative est que les PED ne considèrent même pas l'hypothèse de diminuer leurs émissions. Le risque est plutôt, si seuls des engagements contraignants sont considérés, que ces pays mettent tous leurs efforts dans la négociation d'objectifs laxistes et que les pays de l'Annexe I leur concèdent ceux-ci pour les faire entrer dans le système au prix d'une forte dévaluation du carbone. Ce problème peut être contourné de trois manières : i) par l'absence de pénalités, ii) par des objectifs basés sur des critères de performance plutôt que des valeurs absolues, iii) par un prix plancher pour le carbone.
3. *Engagements de bonne foi et incitations.* Dans un marché international du carbone, la mise en place d'un prix plafond du carbone permettrait de circonscrire l'incertitude sur le prix du carbone et de borner les coûts de réductions.
4. *Un dispositif pour les industries intensives en énergie exposées à la concurrence internationale.* Les craintes liées à des contraintes asymétriques entre pays avec ou sans engagement sont souvent surestimées : l'impact des prix du carbone sur le prix de production est d'un ordre de grandeur inférieur aux oscillations du taux de change (Quirion et Hourcade, 2004). Le risque est bien supérieur sur la valeur des actions. Aucun gouvernement n'est en position de résister à la pression visant à protéger les emplois. Cependant, les prix du carbone différeront d'un pays à l'autre, d'un secteur à l'autre, et ce n'est que pour les industries intensives en énergie et exposées à la concurrence internationale qu'une égalisation des coûts marginaux et donc des prix du carbone sera nécessaire. Un accord international spécifique sur ces industries semble alors nécessaire.

II.3.2. Désenclaver la négociation climat par la mise en convergence des objectifs du Développement durable et de la lutte contre le changement climatique [4] [5]

Un des points les plus importants du dossier climatique est sans doute de reconnaître la nature des liens existants dans un faisceau d'enjeux de gouvernance à l'échelle internationale : sécurité

énergétique, environnement local, dette, dualisme social, réforme du financement international et aide publique au développement, objectifs du millénaire et dorénavant du développement durable. En 2015, deux événements majeurs sur la scène internationale se sont déroulés : la définition et l'adoption, avant la COP21, de dix-sept nouveaux Objectifs de Développement Durable qui précisent de nouvelles priorités succédant aux Objectifs du Millénaire pour le développement. Les horizons respectifs des objectifs portés dans le cadre de ces négociations sont 2030 pour les ODD et 2025-2030 pour les contributions prévues déterminées au niveau *national* (CPDN – en anglais *INDC* pour *intended nationally determined contributions*). Ces deux dossiers ont été jusqu'à présent traités de manière distincte. Pourtant, les enjeux de réduction de la pauvreté sont liés de manière inextricable aux enjeux du changement climatique, particulièrement dans les pays en développement (Hallegatte *et al.*, 2016).

Dans la mesure où le changement climatique peut ralentir et même inverser des tendances de réduction de la pauvreté, les trajectoires compatibles avec un objectif de réchauffement limité à 2°C nécessitent que les stratégies de réduction de la pauvreté intègrent la contrainte d'un développement carbonique bas. Or, jusqu'à présent, les différents fonds climat existants ont échoué à proposer des réponses concrètes pour cibler la sortie de la pauvreté comme politique d'adaptation prioritaire ou selon des modalités contribuant à des trajectoires bas carbone.

C'est pourquoi nous proposons la création d'une fenêtre de financement pauvreté-adaptation-atténuation (FPA2) dans le Fonds Vert Climat. Ce mécanisme viserait à mettre en œuvre des synergies entre réduction de la pauvreté, adaptation et atténuation, de manière à mutualiser les efforts et faire en sorte que les infrastructures et équipements installés dans le cadre du mécanisme soient à la fois résilients aux changements climatiques et contribuent à un développement bas carbone. Il s'agit d'éviter d'avoir à mettre au rebut prématurément des équipements (la durée de vie des installations atteint plusieurs décennies) qui n'auraient pas ou mal intégré l'ensemble des contraintes à la fois en matière d'adaptation et d'émissions de GES. Le type d'actions concernées vise par exemple la construction de logements pour diminuer le nombre de personnes vivant dans des bidonvilles, et l'intégration de modes de construction bioclimatiques à la fois adaptés à l'évolution du climat et entraînant de faibles consommations d'énergie et d'émissions de GES. Les exemples peuvent se décliner par besoin fondamental (Tableau 11).

Ce mécanisme vise à proposer une réponse aux pays en développement qui font le plus souvent de la lutte contre la pauvreté leur priorité. Il part du constat que le fonctionnement et l'attribution des fonds climat existants ne sont pas adaptés au ciblage de la réduction de la pauvreté :

- Dans le cadre de la problématique adaptation-pauvreté, il conviendrait d'élaborer des critères pour sélectionner des actions spécifiquement adaptées aux actions concrètes de lutte contre

la pauvreté. Or, jusqu'à présent, les indicateurs élaborés et proposés pour sélectionner les bénéficiaires des fonds climat sont des indicateurs agrégés au niveau du pays, essayant de refléter à la fois sa vulnérabilité à la fois en termes d'exposition aux impacts directs du CC et sa vulnérabilité du fait de mal-développement. Ceux-ci ne permettent pas de cibler directement la réduction de la pauvreté comme stratégie d'adaptation.

- Pour ce qui relève de l'atténuation, les financements vers les pays en développement vont de manière fortement majoritaire vers les pays ou régions où les émissions de GES sont déjà élevées ou en forte croissance, dans le but de maximiser les réductions d'émissions globales. Ceci laisse de côté les pays ou régions où le développement est lent, car il est difficile de faire apparaître des réductions d'émissions par rapport à un scénario de référence par définition peu émetteur de GES.

TABLEAU 11: CONVERGENCES SECTORIELLES EXISTANT ENTRE LA SATISFACTION DE BESOINS FONDAMENTAUX, LA LUTTE CONTRE LE CC ET LA REDUCTION DE LA VULNERABILITE AU CC. CRITERES POUVANT ETRE UTILISES POUR DEFINIR LES PRIORITES D'ACTION DANS L'ALLOCATION DES RESSOURCES DE LA FPA2.

	Objectif réduction pauvreté	Objectif réduction GES	Objectif adaptation	Exemple d'action	Critères d'éligibilité et d'allocation
Habitat	Diminuer le nb de personnes habitant dans des bidonvilles	Limiter les émissions de GES des nouveaux logements	Diminuer la vulnérabilité aux événements extrêmes	Renforcer les modes constructifs bioclimatiques	Pondération (Nb personnes dans le pays habitant dans des bidonvilles, population du pays)
Alimentation	Diminuer le nb de personnes souffrant de malnutrition	Limiter les émissions de GES de l'agriculture	Diminuer la vulnérabilité de l'agriculture aux CC	Améliorer l'efficacité du système agricole de la terre à l'assiette	Pondération (Nb de personnes dans le pays souffrant de la malnutrition, population du pays)
Electricité	Diminuer le nombre de personnes sans accès à l'électricité	Limiter les émissions de GES de la production d'électricité	Contribuer à la résilience du secteur électrique	Développer la production d'électricité décarbonée, efficacité énergétique	Pondération (Nb personnes dans le pays sans accès à l'électricité, population du pays)
Déchets	Réduire la pollution, augmenter le taux de traitement des déchets	Limiter émissions de GES des déchets	Limiter les impacts sanitaires d'une mauvaise gestion des déchets dans un contexte de CC	Installations de captage du gaz de décharge	Pondération (Nb personnes dans le pays exposées à des taux élevés de pollution, population du pays)

Assainissement	Diminuer le nombre de personnes sans réseau d'assainissement	Limiter émissions de GES des effluents	Limiter la vulnérabilité aux inondations / aux épidémies, aux événements extrêmes	Développer des réseaux d'assainissement performants / améliorés	Pondération (Nb personnes dans le pays sans réseau d'assainissement, population du pays)
Transports	Elargir l'accès à la mobilité et améliorer la santé dans les villes	Limiter émissions de GES des véhicules	Construire des infrastructures résilientes aux impacts du CC	Réseaux de transports en commun, mobilités douces	Pondération (Nb personnes dans le pays sans accès à des formes performantes de mobilité, population du pays)
Santé	Améliorer la santé et élargir l'accès au soin	-	Limiter la vulnérabilité aux épidémies, aux événements extrêmes	Augmenter le taux de couverture santé	Pondération (Nb de personnes du pays sans accès à des soins, population du pays)

Les critères habituels de sélection des actions ne sont donc pas adaptés à une problématique de mise en œuvre d'actions visant à réduire la pauvreté dans un contexte de trajectoires bas carbone, résilientes aux impacts du CC.

Pour répondre à ces limites, la fenêtre de financement FPA2 suivrait les modalités suivantes. L'allocation des financements au sein de la fenêtre FP2A se porterait sur les pays ayant de gros déficits dans la satisfaction des besoins fondamentaux. Pour cela, nous avons recours à des critères nationaux sectoriels et spécifiques pour chacun d'entre eux²⁶ (Tableau 11). L'objectif de la FP2A, et donc son critère d'évaluation, est de maximiser le nombre de personnes qui auront gagné l'accès à un besoin fondamental dans les conditions d'éligibilité à la FP2A, c'est-à-dire en intégrant les dimensions adaptation et/ou atténuation. Le recours à ce type de critère constitue une réponse aux demandes des PED sur la priorisation de la lutte contre la pauvreté.

Le niveau de l'aide apportée par le financement fera l'objet d'une approche sectorielle par type de besoin fondamental, de manière à établir un *benchmarking* international. Une première étape est l'évaluation des coûts de satisfaction de ces besoins fondamentaux par secteur : le coût d'accès à l'électricité par personne, le coût d'accès à un système d'assainissement amélioré par personne, le coût d'un système de gestion des déchets par personne, etc. La part de ce coût couvert par la FP2A dépendrait de plusieurs facteurs :

- i) Elle sera fonction de l'enveloppe globale de la FP2A.

²⁶ Afin de ne pas cibler là encore une grosse partie des financements sur quelques pays fortement peuplés – par exemple, en Inde, 25 % de la population, soit 400 millions de personnes, sont sans accès à l'électricité ; parallèlement en Afrique subsaharienne, certains pays ont des accès à des formes modernes d'énergie extrêmement limités mais des populations plus faibles au total –, le critère devra pondérer le taux de non-satisfaction de besoin fondamental par secteur et la population totale du pays.

ii) Si la dimension atténuation est concernée, le niveau de l'aide devra permettre, en plus des autres financements et aides, d'augmenter la rentabilité des installations pour les investisseurs et/ou les fournisseurs de services et, notamment, de prendre en charge le surcoût éventuel du fait du recours à des technologies non carbonées ou en cohérence avec un développement sobre en carbone.

iii) Si la dimension adaptation est concernée, la FP2A couvrira tout ou partie du financement, selon que le changement climatique est la cause principale ou une cause parmi d'autres de l'action.

La possibilité de faire reposer pour partie la FP2A sur des paiements basés sur des résultats doit être explorée, notamment dans le cadre d'un accès direct au financement par l'entité nationale. Cette démarche vise à conditionner l'obtention de tout ou partie des financements à l'atteinte des objectifs. Pour cela, un cadre d'évaluation et de suivi des résultats doit être mis en œuvre à l'appui d'un ensemble d'indicateurs de performance appropriés.

Enfin, des modalités de soutien financier spécifiques (dons, subventions) en fonction du niveau de revenu du pays (selon la typologie utilisée par la Banque mondiale) pourront être appliquées.

Des nombreux éléments de mise en œuvre doivent être encore détaillés (voir [programme de recherche](#)). Néanmoins, le principe d'un droit fondamental au développement est central dans cette proposition. Elle concerne un continuum de pays, puisqu'il y a des pauvres dans tous les pays ; à ce titre elle s'inscrit dans la dynamique de négociation post Durban. Tous les pays pourraient ainsi y être éligibles, les modalités de financement dépendant de leur niveau de revenu. Enfin, cette FPA2 pourrait être en mesure de répondre à une partie des demandes des PED pour lesquels l'éradication de la pauvreté est centrale. En ce sens, elle pourrait contribuer à dépasser une partie des obstacles à la négociation climat et permettre aux PED d'intégrer des objectifs de limitations de leurs émissions plus ambitieux, notamment dans le cadre d'objectifs conditionnels à l'obtention de tels financements, et ainsi instaurer un cycle vertueux de négociation après l'accord de Paris lors de la COP21.

Il est à noter que l'article publié sur ce sujet dans la revue *Climate Policy* a été sélectionné en amont de la COP21 parmi les publications importantes de la revue car apportant une contribution significative.

II.4. Bibliographie

Agarwal A., Narain S. (1991) *Global Warming in an Unequal World: A Case of Environmental Colonialism*. Centre for Science and Environment, Delhi.

Ashton J., Wang X. (2003) Equity and Climate: in principle and practice. In : Adly J. *et al.*, *Beyond Kyoto: advancing the international effort against climate change*. Pew Centre on Climate Change.

Blanford G.J., Richels R.G., Rutherford T.F. (2008) Revised emissions growth projections for China: why post-Kyoto climate policy must look east. Working Paper, September, 32 p.

Bowen H.R. (1943) The interpretation of voting in the allocation of economic resources, *Quarterly Journal of Economics*, 58(1), pp. 27-48.

Chichilnisky G., Heal G., Starrett D. (2000) Equity and Efficiency in Environmental Markets: Global Trade in CO₂ Emissions. In : *Environmental markets: Equity and efficiency*. Columbia University Press.

Den Elzen M.G.J., Berk M.M., Schaeffer M., Olivier O.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. Report No. 728001011, RIVM, Bilthoven, The Netherlands.

Hallegatte S., Bangalore M., Bonzanigo L., Fay M., Kane T., Narloch U., Rozenberg J., Treguer D., Vogt-Schilb A. (2016) *Shock Waves : Managing the Impacts of Climate Change on Poverty*. Washington, DC: World Bank.

Höhne N., Den Elzen M., Escalante D. (2014) Regional GHG reduction targets based on effort sharing: a comparison of studies, *Climate Policy*, 14(1), pp. 122-147.

Lindhal E. (1919) Just taxation, a positive solution. In : Musgrave R.A., Peacock A.T., eds., *Classics in the theory of public finance*. St Martin's, New York, pp.165-200.

Meyer A. (2000) Contraction and Convergence. The Global Solution to Climate Change. Schumacher briefings 5, Greenbooks for the Schumacher Society, Bristol, USA.

Parikh KS, *et al.* (2006) *Integrated Energy Policy*, Report of the Expert Committee. Planning Commission, Government of India.

Phylipsen G.J.M., Bode J.W., Blok K., Merkus H., Metz B. (1998) A triptych sectoral approach to burden sharing greenhouse gas emissions in the European bubble, *Energy Policy*, 26, pp. 929-943.

Pielke R, Wigley T, Green C. (2008) Dangerous assumptions, *Nature*, 452, pp. 531-532.

Quirion Ph., Hourcade J.-Ch. (2004) Does the CO₂ Emission Trading Directive Threaten the Competitiveness of European Industry? Quantification and Comparison to Exchange Rates Fluctuations", European Association of Environmental and Resource Economists Annual Conference, Budapest, June 2004.

Raupach M.R., Marland G., Ciais P., Le Quéré C., Canadell J.G., Klepper G., Field C. (2008) Global and regional drivers of accelerating CO₂ emissions. *PNAS*, 104(24), pp. 10288-10293.

Sachs J.D., Warner A.M. (2001) The curse of natural resources, *Natural Resources and Economic Development*, 45(4-6), pp. 827-838.

Samuelson P.A. (1954) The pure theory of public expenditure, *Review of Economics and Statistics*, 36, pp. 387-389.

Shukla P.R. (1995) Greenhouse gas models and abatement costs for developing nations. A critical assessment, *Energy Policy*, 23(8), pp. 677–688.

Urban F. R. M. J., Benders R. M. J., Moll H. C. (2007) Modelling energy systems for developing countries, *Energy Policy*, 35(6), pp. 3473-3482.

Van Ruijven B, Urban F, Benders R, Moll H, Van der Sluijs J, De Vries B, Van Vuuren D (2008) Modeling energy and development: an evaluation of models and concepts, *World Development*, (36-12), pp. 2801-2821.

III. Conclusions et prolongements des recherches présentées

Cette partie de mon mémoire pour l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches a présenté mes travaux de recherche conduits depuis une dizaine d'années au CIREA, puis dans l'équipe EDDEN des laboratoires PACTE puis GAEL.

Ceux-ci se sont organisés autour de deux axes. Le premier axe porte sur l'élaboration et l'utilisation du modèle Imacim-R France pour des analyses macroéconomiques des politiques climatiques prenant en compte les imperfections de marché et les situations de « second rang ». Le second axe de recherche concerne l'intégration des pays en développement dans le nouveau régime climatique international, à travers l'insertion des politiques climatiques dans les politiques de développement. Ces recherches convergent vers une compréhension des mécanismes de formation des coûts macroéconomiques des politiques de réduction des émissions de GES dans le modèle Imacim-R, que cela soit dans le cas du modèle Imacim-R France appliqué à la France ou dans le cadre de l'application du modèle Imacim-R monde appliqué à un pays émergent, l'Inde.

Dans un monde de second rang, tel que représenté dans le modèle Imacim-R, avec des rigidités des marchés du travail, des anticipations imparfaites des agents, des économies pouvant fonctionner avec une sous-utilisation des facteurs de production (capital et travail) et enfin la prise en compte des inerties liées aux générations de capital, les coûts de réduction des émissions sont avant tout des coûts de transition. Ces coûts sont élevés sur le court-moyen terme, sous l'effet notamment des inerties du capital installé, des anticipations myopes etc., mais à plus long terme l'ampleur de ces coûts diminue par la modification structurelle des systèmes technico-économiques et leur adaptation aux nouvelles conditions économiques et de fiscalité sur les énergies fossiles.

Néanmoins, la mise en œuvre d'une taxe carbone comme seule politique climatique n'apparaît pas optimale, que cela soit dans le cas de la France ou dans celui de l'Inde. Dans le contexte d'un pays émergent comme l'Inde, un prix international unique du carbone à l'ensemble des secteurs combiné à des transferts compensatoires ne constituerait pas non plus un accord acceptable.

Sous certaines conditions, les politiques climatiques peuvent au contraire apporter un gain net par rapport à une situation de référence, dans la mesure où cette dernière est sous-optimale. Des politiques sectorielles prenant en compte les spécificités, dynamiques et barrières non financières dans chacun des secteurs, des politiques d'infrastructures et des réformes fiscales peuvent ainsi conduire dans le cas de la France ou de l'Inde à des gains économiques sur le moyen-long terme.

Cependant, les résultats pour la France montrent que même avec des hypothèses très optimistes sur la pénétration de l'efficacité énergétique et des technologies bas carbone, le déclenchement d'une

transition énergétique bas carbone pourrait être entravé par les coûts d'ajustement initiaux. Ces coûts d'ajustement peuvent être surmontés par un ensemble de mesures comprenant des mesures de régulation de l'énergie côté demande et côté offre, de nouveaux modèles de développement pour les infrastructures de transport et d'aménagement du territoire, une taxe sur le carbone, et une négociation sociale réussie sur le recyclage des produits de cette taxe.

L'impact de la transition énergétique sur l'emploi est central dans un contexte de taux élevé de chômage à la fois sur le court terme, mais aussi à plus long terme. De ce point de vue, une meilleure compréhension des enjeux de l'évolution de la productivité du travail au sein de chacun des secteurs mériterait des recherches ultérieures. L'objectif serait d'identifier celles des branches plus ou moins intensives en emploi qui sont appelées à se développer, et d'évaluer les impacts sur l'évolution des coûts de production sur les secteurs « ouverts » à la concurrence internationale et sur les secteurs abrités.

Au niveau de la coordination internationale de la réduction des émissions de GES et des négociations internationales, mes travaux de recherche remettent en question l'approche très climato-centrée des recherches fondées sur un prix unique du carbone, approche sur laquelle s'est focalisée la réflexion économique en appui à la négociation climat jusqu'à l'échec de la Conférence de Copenhague. Mes travaux plaident au contraire pour une intégration des politiques climatiques dans les politiques sectorielles de développement, et une mise en avant des synergies possibles entre atténuation, adaptation et priorités de développement. Les modalités de mise en œuvre effective du mécanisme FPA2 (voir page 80) devraient être approfondies : indicateurs pertinents pour mesurer les besoins fondamentaux, seuils d'éligibilité du mécanisme ; critères pour la sélection de l'allocation des financements etc.. Un des objectifs à terme est d'évaluer les besoins financiers qui permettraient de mettre en œuvre de manière effective ces synergies entre réduction de la pauvreté, adaptation et atténuation. Des approches prospectives propres à plusieurs pays pourraient être menées. L'enjeu est également de comprendre les transformations structurelles ou non induites par les INDC, de manière à analyser et à réduire, par des mécanismes appropriés, le *gap* entre les INDC et un objectif global de 2°C.

Au-delà des résultats macroéconomiques et du contenu même des scénarios, ce travail de recherche interroge le rôle des scénarios bas carbone et des outils de modélisation utilisés pour leur production dans l'accompagnement de la décision publique. Tout d'abord, l'objet « scénario bas carbone » et notamment sa phase d'élaboration peuvent constituer un moment privilégié pour favoriser la structuration d'un débat public autour de visions nationales contrastées (déclinées sous le format scénarios) bas carbone. Ainsi la communauté de modélisation intégrée énergie-économie-

environnement (EEE), mobilisée jusqu'alors par le GIEC, est amenée aujourd'hui à composer avec une approche politique de la construction de visions du futur, affirmée au moment de la CoP21, qui s'adosse à des propositions nationales stratégiques et des visions de futur (INDCs dans le processus CoP) destinées à être intégrées par le débat. L'exercice [*Deep Decarbonisation Pathways*](#) (DDPP), auquel j'ai contribué pour le chapitre France, en est une excellente illustration.

Un autre enjeu concernant le rôle d'accompagnement des scénarios bas carbone dans la décision publique renvoie à la gestion dynamique des trajectoires de décarbonation tout au long de leur mise en œuvre et au développement d'une architecture de suivi pour éviter dérives et surcoûts dans la réalisation des objectifs. L'opérationnalisation d'une telle architecture devra faire l'objet de travaux complémentaires, par exemple pour la définition des indicateurs ou des seuils d'alerte. Ceci devrait être confronté notamment dans le cadre de stratégies réelles de pays. Ces questions de recherche sont d'un intérêt particulier suite à l'Accord de Paris, qui appelle tous les pays à surveiller la mise en œuvre de leurs contributions nationales et à revoir leur ambition régulièrement.

Partie 3 – Nouvelles perspectives de recherche

Ma mutation encore récente à Grenoble dans l'équipe EDDEN et l'intégration de l'équipe EDDEN dans le laboratoire GAEL m'ont ouvert de nouvelles perspectives de recherches, que cela soit en termes d'enrichissement méthodologique avec le développement potentiel de recherches transversales entre les axes Consommation et Energie au sein du laboratoire GAEL, ou en termes de collaborations interdisciplinaires avec des laboratoires situés sur le campus universitaire grenoblois et menant des recherches dans leur discipline sur le changement climatique (voir les laboratoires LTHE et ISTERRE plus bas). Enfin, l'appropriation du modèle du système énergétique POLES ([voir annexe](#)), développé depuis plus de vingt ans au sein de l'équipe EDDEN, m'offre de nouvelles possibilités pour développer de nouvelles évaluations des trajectoires de décarbonation.

Ces nouvelles perspectives de recherche s'organisent autour de l'évaluation et de la gouvernance de la transition énergétique et des politiques climatiques :

1. La question des relations que la transition énergétique entretient avec la sphère **des ressources naturelles**, qu'il s'agisse des géoressources telles que les matériaux structurels (acier, ciment, cuivre, verre) ou les métaux rares, mais aussi des enjeux posés par le recours au gaz naturel comme énergie de transition vers une décarbonation profonde. Ces dimensions nous conduiront à une réévaluation économique, énergétique, écologique et géopolitique des scénarios de transition énergétique.
2. La question des **hommes et des sociétés** au cœur de la transition énergétique : non seulement tous les scénarios de transition énergétique et leurs analyses font apparaître le besoin de mieux comprendre les déterminants du comportement des consommateurs, de manière à identifier les politiques de maîtrise de la demande d'énergie et d'amélioration de l'efficacité énergétique performantes d'un point de vue économique et environnemental (l'individu comme consommateur) ; mais il apparaît également désormais nécessaire d'associer des processus participatifs et démocratiques pour améliorer la faisabilité sociotechnique des scénarios de transition énergétique (l'individu comme citoyen). Ceci amène à repenser l'articulation du triangle Sciences – Sociétés – Politiques.

I. Transition énergétique et ressources naturelles

Un des résultats les plus robustes provenant de l'évaluation des trajectoires de décarbonation est la nécessité, après la promotion de l'efficacité énergétique, de décarboner la production d'électricité et d'électrifier les usages (e.g., Luderer *et al.*, 2012 ; Sugiyama, 2012; Williams *et al.*, 2012 ; IEA, 2014 ; IPCC, 2014 ; Krey *et al.*, 2014 ; McCollum *et al.*, 2014 ; DDPP, 2015). En effet, une stabilisation du changement climatique (que cela soit à 2°C ou à 3°C) requiert à long terme de réduire les émissions de GES à presque zéro (Collins *et al.*, 2013 ; IPCC, 2013). D'autre part, la substitution des énergies fossiles vers une électricité décarbonée est la seule option technique possible pour décarboner massivement les secteurs fortement consommateurs d'énergie tels que l'industrie, les transports ou le bâtiment. Un des enjeux principaux pour cela est de basculer d'un système énergétique encore majoritairement basé sur des énergies de stock vers des énergies de flux, les énergies renouvelables. Ce basculement peut néanmoins poser deux problèmes en termes de gestion des géoressources. Le premier renvoie à la consommation en matériaux d'un système énergétique décarboné ; le second à la substitution du charbon par du gaz naturel comme possible énergie de transition avant un déploiement massif des énergies renouvelables.

*1.1. Transition énergétique et matériaux structurels et stratégiques*²⁷

Ce travail de recherche interdisciplinaire se situe à la convergence de deux problématiques majeures: la décarbonation des systèmes énergétiques et l'approvisionnement en matières premières minérales. En effet, les énergies renouvelables comme le solaire et l'éolien nécessitent de l'ordre de 90 fois plus d'aluminium et 50 fois plus d'acier et de cuivre que les technologies fondées sur les énergies fossiles (par kWe installé). Des travaux antérieurs ont évalué le contenu en ressources minérales de la décarbonation en quantifiant le contenu en ressources minérales de scénarios globaux de décarbonation (Hertwich, 2014; Vidal *et al.*, 2013). Mais ces travaux ne s'appuient pas sur une évaluation intégrée, tenant compte des impacts économiques et des dynamiques des marchés des métaux (production, demande, prix, parts de marchés) occasionnés par la consommation supplémentaire en ressources minérales induite par la décarbonation du système énergétique.

Le travail envisagé vise précisément à intégrer de manière rigoureuse la dimension des ressources minérales et leurs dynamiques de marché dans les évaluations économiques, et environnementales

²⁷ Ce nouvel axe de recherche s'inscrit dans le prolongement, dix années après, du projet financé par la Fondri (IDDRI et Entreprises pour l'Environnement) portant sur les *Scénarios sous contrainte carbone* (cf. page 18) et en cohérence avec la création de la Chaire Géoressource et Transition Énergétique pilotée par Olivier Vidal (ISTERRE, laboratoire de géologie), Patrick Criqui (EDDEN) et moi-même.

de la décarbonation des systèmes énergétiques. En l'état, les approches disciplinaires abordant ces problématiques présentent les limites suivantes:

- Dans la communauté des économistes de l'énergie ; la dimension ressources minérales est absente dans les modèles énergie-économie-environnement usuellement utilisés pour l'évaluation économique de scénarios de décarbonation (communauté Energy Modeling Forum, GIEC). L'évolution du coût des technologies de production des énergies renouvelables par exemple ne tient compte que du progrès technique autonome ou induit par les politiques climatiques mais n'intègre pas l'évolution du contenu en ressources minérales de ces technologies, et l'évolution du coût de ces ressources.
- Dans la communauté des géologues ; les modèles de type « pic de Hubbert », développés et utilisés par les géologues pour prédire les pics de production des ressources minérales trop synthétiques, pour incorporer l'impact des variables économiques sur les domaines de ressource et les technologies.

De premiers travaux développés à l'IsTerre, laboratoire de géologie à Grenoble, intégrant l'aspect ressource dans des modèles économiques ont été menés :

- Les modèles macroéconomiques dynamiques de type Goodwin-Keen (Goodwin, 1967; Keen, 2000) développés pour l'aspect ressource visent à représenter des évolutions brusques de type *krach* qui seraient induits par la contrainte des stocks finis d'énergie renouvelable ou par l'impact environnemental de leur production. Ces modèles restent théoriques et ne sont pas capables d'embrasser la complexité des interactions entre capacité de production des matières premières et économie
- Les modèles dynamiques synthétiques de type "proie-prédateurs" (équations de Lotka-Volterra; Lokta, 1925; Volterra, 1926) possèdent une physique claire, qui inclut à la fois les contraintes géologiques, la production primaire et le recyclage, les revenus, coûts de production et bénéfices des secteurs de production, et le prix des matières premières. Ces modèles sont cependant limités par les données disponibles, ils restent très agrégés et globaux et nécessitent d'apporter des contraintes exogènes.

Les modèles existants ne permettent donc pas d'embarquer la complexité des dynamiques sectorielles et technologiques du système énergétique et notamment l'impact des variations de prix sur l'activité d'exploration, le progrès technique et la mise en valeur de nouvelles catégories de ressources. Répondre à l'objectif de la recherche nécessite donc d'avoir un modèle dynamique faisant le lien entre demande, capacités de production primaire et secondaire de matières premières, prix, besoins énergétiques. Cette étape est cruciale et elle est au cœur de la problématique scientifique. Pour

répondre à ce verrou scientifique que les travaux de modélisation développés en économie de l'énergie ou en géologie ne permettent pas de lever seuls, nous proposons donc de coupler le modèle proie-prédateur développé à ISTERRE avec le modèle POLES, modèle économique en équilibre partiel de simulation du système énergétique mondial développé à GAEL-edden.

Le modèle proie-prédateur permet d'évaluer les évolutions globales de réserves et de production primaire et secondaires et de prix des matières premières pour des scénarios de demande imposés (exogènes). Le modèle énergétique POLES fournit quant à lui des évaluations technico-économiques de scénarios de décarbonation. Il présente des niveaux élevés de désagrégation régionale (66 régions), sectorielle (25 secteurs de demande d'énergie) et un fort niveau de détail technologique. Les prix des énergies sont endogènes avec une description explicite des fondamentaux de chaque marché international et une représentation détaillée des contraintes de ressources. Le modèle opère par simulations récursives qui permettent des ajustements progressifs des variables d'offre et de demande, d'une part et des prix, d'autre part. Les coûts, performances et "*learning curves*" sont explicites pour une vingtaine de technologies.

Le couplage des modèles sera alimenté par une base de données en cours de développement à IsTerre. Elle permet de répertorier le contenu en matériaux des technologies de production d'énergie et des biens d'équipements sur la base des acquis du projet RemInEr (projet fédérateur du CNRS: Les ressources minérales pour l'énergie renouvelable). Cette base permettra d'accéder aux données de matières premières par secteur industriel qui interviennent dans l'industrie de l'énergie renouvelable au niveau mondial, et cela en intégrant toute la chaîne de valeur depuis l'extraction jusqu'au produit fini et son recyclage. Cela nécessite d'avoir des données qui sont actuellement dispersées dans des bases différentes et souvent non compatibles. Le travail consistera à utiliser les procédures développées à IsTerre qui permettent d'agrèger ces bases avec des liens sémantiques. Il s'agit d'un thème de recherche nouveau, qui nécessite de bonnes compétences en gestion de bases de données disponibles à IsTerre.

Nous proposons de tester l'approche envisagée pour le cas très bien documenté du cuivre, et ensuite d'étendre l'étude à l'aluminium, le fer et l'acier, le néodyme et le dysprosium. Les résultats de la modélisation permettront en eux-mêmes de lever un certain nombre de verrous en permettant : une actualisation des scénarios de décarbonation innovante à plusieurs titres (nouvelle évaluation des trajectoires technologiques compatibles avec les objectifs de décarbonation et de leurs coûts) ; une intégration dans les "courbes d'apprentissage technologique" de l'évolution de la composante "matériaux" dans le coût des technologies, conjointement aux effets du progrès technique ; une analyse des risques de tension sur certaines ressources minérales et enjeux géopolitiques associés.

Les étapes du travail seront les suivantes:

- 1) Comprendre les mécanismes de marché des métaux et la physique sous-jacente aux ressources minérales. Définir les équations différentielles qui permettent de décrire le(s) système(s): quel niveau de détail, quels couplages, quelles causes ? Coupler les flux et les stocks physiques et monétaires, intégrer d'autres dimensions comme les impacts environnementaux et l'énergie. Réfléchir aux dynamiques court-terme et long-terme.
- 2) Utiliser des données historiques pour contraindre les paramètres (lesquelles, comment quelles incertitudes?). Valider les approches avec des exemples bien documentés (données historiques depuis 1900). Capacité à reproduire l'histoire passée?
- 3) Intégrer les coûts énergétique et environnementaux: mettre en relation le modèle POLES avec les bases de données existantes (géologiques, ACV, impacts) de l'IsTerre.
- 4) Analyser les résultats des scénarios existant de transition énergétique avec la prise en compte des ressources minérales et identifier les meilleurs trajectoires des points de vue environnemental, économique, énergétique, géopolitique.

Eléments de bibliographie

Ancre (2015) Ressources minérales et énergie. Rapport du groupe Sol et sous-sol de l'Alliance Ancre, 75 p.

Clingendael International Energy Program (2012) Current Trends and Strategies, POLINARES Working Paper, n° 43, April 2012.

Hertwich E. G., Gibon T., Bouman E., Arvesen A., Suh S., Heath G., Bergesen J., Ramirez A., Vega M., Shi L. (2015) Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112 (20).

Vidal O., Goffé B., Arndt N. (2013) Metals for a low-carbon society, *Nature Geoscience*, 6, pp. 894-896.

Vidal O., Weihed P., Hagelüken C., Bol D., Christmann P., Arndt N. (2013) ERA-MIN Research Agenda - ERA-MIN, The European Research Area Network (ERA-NET) on the Industrial Handling of Raw Materials for European Industries - (Coordinator: CNRS - the French Research Council, Paris, France)

1.2. Le gaz naturel dans la décarbonation : énergie de transition et risque de dépendance au sentier

Le boom des énergies non conventionnelles aux Etats-Unis et les incertitudes sur la mise en œuvre des politiques climatiques, combinés à différents enjeux tels que la sécurité énergétique (diversification des mix énergétiques, répartition géographique des ressources...), la diminution de (certaines) pollutions locales, la recherche d'une meilleure compétitivité internationale et les caractéristiques techniques des centrales au gaz (rapidité de construction des installations, rôle de back-up dans le mix électrique...) pourraient, pour certains, conduire à **l'émergence d'un âge d'or du gaz naturel** (AIE, 2011).

Parallèlement, la **substitution charbon/gaz apparaît comme un levier de décarbonation**, pour les économies les plus intensives en charbon, solution plus rapidement et amplement mobilisable qu'une substitution directe charbon/ENR. Le déploiement des gaz de schiste aux Etats-Unis aurait ainsi contribué à une baisse des émissions de GES (Feng *et al.*, 2015) et la substitution du charbon par du gaz figure au cœur du *Clean Power Plan* de l'administration Obama.

Pourtant, même si à court ou moyen terme le gaz naturel peut effectivement conduire à une réduction significative des émissions de gaz à effet de serre dans des systèmes énergétiques intensifs en charbon, une telle option est-elle compatible avec une « décarbonation profonde » des systèmes énergétiques, voire à la neutralité carbone à l'horizon 2050 et au-delà ?

Le **risque de lock-in** dans des infrastructures gazières doit être pris en compte si le recours au gaz n'est compatible avec les objectifs de décarbonation que sur un horizon de moyen terme (15 ans), à la suite duquel le gaz devrait soit laisser la place aux ENR soit être équipé de CCS si la technologie est disponible à cette date. Or la durée de vie de nombre d'installations énergétiques est bien supérieure à cet horizon. L'hypothèse d'une mise au rebut prématurée des capacités de production émettrices de GES pour permettre le déploiement de technologies complètement décarbonées doit donc être intégrée dans l'évaluation des trajectoires de décarbonation. Ce choix aurait bien sûr un impact sur le coût global des trajectoires et peut conduire à redéfinir les politiques climatiques à privilégier (Rozenberg *et al.*, 2014), notamment en tenant compte des obstacles politiques et sociaux que les gouvernements pourraient rencontrer pour fermer prématurément ces unités de production (Laffont et Tirole, 1991) et pourrait conduire à la négociation de compensations pour l'indemnisation des propriétaires des installations et des employés. Jusqu'à présent, la question des coûts échoués dans les trajectoires technico-économiques de décarbonation a surtout été abordée pour la production d'électricité à base de charbon (Jonhson *et al.*, 2015 ; Guivarch *et al.*, 2010 ; Bertram *et al.*, 2015), mais pas dans le cas des trajectoires de décarbonation avec une transition par le gaz.

Un second aspect à considérer est la prise en compte **des effets d'apprentissage** dans les technologies bas carbone. Ceux-ci modifient significativement le coût des trajectoires et le timing des options de décarbonation (Manne et Richels, 2004). Ces effets peuvent en particulier compenser sur le long terme une partie des coûts échoués dans les technologies carbonées. Néanmoins, il est à craindre qu'une transition par le gaz pousse à retarder l'innovation sur les ENR. Ceci renchérirait le coût dans le futur du déploiement des ENR pour rattraper le retard accumulé (Acemoglu *et al.*, 2012). Henriët et Schubert (2016) évaluent par exemple les conditions de déploiement du gaz de schiste en Europe, en tenant compte de l'arbitrage entre le financement de l'exploration dans les gaz de schiste et le financement de la R&D européenne dans les renouvelables.

Ainsi, deux des enjeux centraux pour analyser le rôle possible du gaz dans les trajectoires de décarbonation sont la dépendance au sentier à travers le double effet des coûts échoués et des effets d'apprentissage sur les nouvelles technologies (Aghion *et al.*, 2014). Notre travail de recherche vise à étudier sous quelles conditions le gaz naturel peut constituer une énergie de transition à court/moyen terme, tout en tenant compte de la perspective d'une décarbonation profonde de long terme découlant de l'Accord de Paris. La question centrale sera celle des effets potentiels de dépendance au sentier dans la mise en œuvre des trajectoires de décarbonation aux horizons intermédiaires (2030 et 2050) dans le cadre d'un objectif ultime de plus long terme de décarbonation totale du système énergétique. Cette question sera abordée d'un point de vue économique et nécessitera l'étude des coûts globaux des différentes trajectoires énergétiques. L'accent sera mis sur l'étude des inerties dues aux générations de capital, les coûts échoués éventuels, les risques d'irréversibilités et les effets d'apprentissage dans le développement des options technologiques. Pour mener à bien ces objectifs, nous nous appuyerons sur de nouveaux développements du modèle POLES (voir [annexe](#)).

Eléments de bibliographie

Acemoglu D., Akcigit U., Hanley D., Kerr W. (2012) Transition to Clean Technology. Mimeo.

Aghion P., Hepburn C., Teytelboym A., Zenghelis D. (2014) Path dependence, innovation and the economics of climate change. Policy Paper. Centre for Climate Change Economics and Policy and Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment. A contributing paper to the New Climate Economy project.

Bertram C., Johnson N., Luderer G., Riahi K., Isaac M., Eom J. (2015) Carbon lock-in through capital stock inertia associated with weak near-term climate policies, *Technological Forecasting and Social Change*, 90, pp. 62-72.

Feng K., Davis S., Sun L., Hubacek K. (2015) Drivers of the US CO₂ emissions 1997–2013, *Nature Communication*, (6).

Guivarch C., Hood C., Unit C. C. (2010) Early retirement of coal-fired generation in the transition to low-carbon electricity systems. Data and analyses.

Henriet F., Schubert K. (2016) Is shale gas a good bridge to renewables? An application to Europe.

International Energy Agency (2011) Are We Entering a Golden Age of Gas? World Energy Outlook Special Report, OECD, Paris.

Laffont J.-J., Tirole J. (1991) The politics of government decision-making: A theory of regulatory capture, *Quarterly Journal of Economics*, 106 (4), pp. 1089-1127.

Manne A., Richels R. (2004) The impact of learning-by-doing on the timing and costs of CO₂ abatement, *Energy Economics*, 26(4), pp. 603-619.

Rozenberg J., Vogt-Schilb A., Hallegatte S. (2014) Transition to clean capital, irreversible investment and stranded assets. World Bank Policy Research Working Paper, (6859).

Johnson N., Krey V., McCollum D. L., Rao S., Riahi K., Rogelj J. (2015) Stranded on a low-carbon planet: implications of climate policy for the phase-out of coal-based power plants, *Technological Forecasting and Social Change*, 90, pp. 89-102.

II. Les hommes dans la transition énergétique

II.1. *Le consommateur : analyse des comportements de consommation énergétique et de leurs inflexions*

Un des enjeux clairement identifié pour réussir la transition énergétique, qui constitue aussi un élément de robustesse des stratégies de décarbonation (cf. page 57), réside dans la possibilité de mobiliser des potentiels importants d'amélioration de l'efficacité énergétique, et pour cela de surmonter *l'energy efficiency gap*. Un autre enjeu est la promotion de comportements de consommation d'énergie plus sobres. La mobilisation des potentiels d'efficacité énergétique et de sobriété énergétique nécessite d'avoir une meilleure compréhension des déterminants des consommations d'énergie pour différents types de services énergétiques (principalement mobilité et consommations du secteur résidentiel, mais également pour l'achat de biens de consommation alimentaires ou de la vie quotidienne) et des leviers que l'on peut mobiliser pour infléchir le contenu carbone de ces consommations. Le premier champ d'application vise la compréhension de la décision de rénovation thermique par les ménages-occupants ou les propriétaires-bailleurs des logements.

La réalisation des économies d'énergie nécessaires dans le secteur résidentiel pour atteindre les objectifs du Grenelle et de la loi TECV²⁸ implique l'investissement dans la rénovation énergétique des bâtiments. Mais de nombreuses barrières, de plusieurs types, entravent l'exploitation des gisements d'économies d'énergie. Au niveau des décisions individuelles des ménages, citons les barrières économiques : coût de l'investissement, coûts de transaction, contraintes de financement, risque lié à l'irréversibilité de l'investissement, diverses incertitudes sur les gains énergétiques et prix futur de l'énergie etc. ; au niveau des barrières individuelles, citons l'information imparfaite, la rationalité limitée des ménages, le manque de sensibilisation pour la question, le sentiment d'impuissance, la peur de la gêne des travaux, la préférence pour le statu quo. Cette priorité de recherche reposera sur trois approches complémentaires :

Evaluation, en économie expérimentale, de l'impact des politiques de soutien à la rénovation thermique de l'habitat sur les taux d'actualisation implicites des ménages.

²⁸ La loi portant Engagement National pour l'Environnement (ENE, dite loi Grenelle) avait fixé comme objectif de diminuer d'au moins 38 % la consommation d'énergie des bâtiments et de réduire de moitié les émissions de CO₂ dans le parc résidentiel d'ici 2020. Le titre II de la loi TECV intitulé *Mieux rénover les bâtiments pour économiser l'énergie, faire baisser les factures et créer des emplois* introduit des dispositions permettant d'accélérer et d'amplifier les travaux de rénovation énergétique des bâtiments pour économiser l'énergie. L'objectif est de rénover, à partir de 2017, 500 000 logements (dont au moins la moitié est occupée par des ménages aux revenus modestes, visant ainsi une baisse de 15 % de la précarité énergétique d'ici 2020). La loi prévoit également des dispositifs spécifiques ciblant la rénovation des copropriétés privées : création de fonds de garantie, du système de tiers financement.

Cette approche repose sur un transfert des outils méthodologiques de l'économie expérimentale, développés jusqu'à présent au sein de l'UMR GAEL pour l'étude des comportements alimentaires et de biens durables, aux questionnements relatifs à la consommation énergétique. Une expérimentation pourrait ainsi être élaborée pour révéler plus particulièrement le taux d'actualisation des ménages dans leurs décisions d'investissement pour des projets de rénovation thermique de l'habitat. Une question centrale sera de tenter d'évaluer l'impact de différentes politiques de soutien au financement de travaux de rénovation thermique de l'habitat (crédit d'impôt, prêt à taux zéro, tiers financement...) sur les taux d'actualisation implicites des ménages pour leurs décisions de rénovation thermique de l'habitat.

L'identification des déterminants de la décision de rénovation dans les copropriétés privées et des mesures permettant de cibler spécifiquement la rénovation thermique pour cette partie du parc de logements.

Les copropriétés privées représentent le segment du parc de logements le plus difficile à mobiliser pour la rénovation thermique. Il représente pourtant 8 millions de logements, soit 27 % des logements. Outre les barrières classiques aux investissements individuels des ménages dans les économies d'énergie, certaines sont spécifiques aux copropriétés où de nombreux acteurs interviennent dans la prise de décision d'investir dans la rénovation énergétique d'un bâtiment. Nous abordons ici la question micropolitique : il faut compter non seulement avec les copropriétaires, le conseil syndical et le syndic, mais aussi avec les locataires, le plus souvent avec un architecte ou un bureau d'études (en tant que conseil technique externe), la collectivité territoriale (qui peut allouer des subventions), des animateurs (ex agence locale de l'énergie) (Varenio, 2012). Les relations au sein de la copropriété (mécontentement, aspirations communes ou divergentes, climat social, conflits passés et présents, existence d'un leader de confiance au sein du conseil syndical...), la gouvernance de celle-ci (règles de vote, bénévolat, rémunération du syndic, modalités de construction du consensus...) et le rapport aux autorités et expertises exogènes, sont déterminants dans la décision collective d'investissement en matière de rénovation énergétique.

La communauté d'agglomération grenobloise (la Métro) a initié un programme de rénovation thermique appelé Mur/Mur, déboursant des aides spécifiques pour la réalisation de travaux de rénovation dans les copropriétés. L'objectif initial du programme était de parvenir à rénover 5 000 logements. *Ex post*, sur les 9 825 logements qui se sont à un moment rapproché du programme Mur/Mur et mis en débat au sein de leur copropriété l'engagement possible dans le programme, 4 469 logements en copropriétés ont effectivement voté pour la réalisation de travaux de rénovation dans le cadre du programme Mur/Mur. Des données recueillies par la Métro sont disponibles pour 84

copropriétés ayant décidé d'entreprendre les travaux. Ce travail s'appuiera sur les données qualitatives et quantitatives fournies par le programme Mur/Mur 1 :

- Les matériaux qualitatifs sont des entretiens menés avec les principaux acteurs de la campagne (propriétaires, gestionnaires immobiliers, conseillers techniques, services de la municipalité, etc.). Ce matériau peut fournir une meilleure compréhension des variables qui ont une incidence sur les décisions, positives ou négatives, concernant la réhabilitation thermique (économies d'énergie, motivations environnementales, valorisation du bien immobilier, effet d'opportunité, interactions humaines, etc.). Il sera complété le cas échéant par des entretiens complémentaires pour fournir une vision plus globale.
- Une base de données renseigne des informations pour toutes les copropriétés qui ont été en contact avec l'équipe du programme, qu'ils aient finalement décidé de participer à l'opération ou non. Cette base de données contient, pour chaque copropriété, des informations sur le statut des occupants (propriétaire-bailleur vs propriétaire-occupant), le nombre d'appartements, l'énergie utilisée pour le chauffage, l'estimation de la consommation d'énergie avant travaux, le type d'énergie utilisée pour le chauffage, l'estimation de l'amélioration de la performance énergétique attendue des travaux de réaménagement, le coût total des travaux, le niveau de subvention, etc.

Cette base de données permettra d'effectuer une analyse statistique des variables clés menant à engager ou non les travaux de rénovation : le niveau de revenu, la part de locataires par rapport aux propriétaires occupants, la taille de la copropriété, le système de chauffage collectif ou individuel, etc. En outre, la question du taux d'actualisation implicite sera explorée, même si une estimation précise de celui-ci ne sera pas possible avec les données existantes.

Des discussions sont également en cours pour accompagner la Métro dans un second volet du programme Mur/Mur par l'incorporation d'un volet de recueil de données systématiques. Un programme de recherche dédié pourrait être adossé dès le montage du projet.

Préférences individuelles et décisions d'investissement dans les maisons individuelles.

Bien que la rénovation thermique soit identifiée comme un vecteur d'économies d'énergie dans les maisons individuelles, dans de nombreux cas ces travaux ne sont pas réalisés. Une question importante est donc de comprendre les raisons pour lesquelles les propriétaires de maisons individuelles n'investissent pas dans l'amélioration de l'efficacité énergétique de leur logement et de savoir dans quelle mesure ces décisions sont liées aux préférences individuelles. A la différence des copropriétés

pour lesquelles les décisions collectives sont des processus longs et complexes, la décision de réaliser ces travaux pour les maisons individuelles dépend seulement des choix individuels.

Nous nous proposons d'étudier le rôle des préférences individuelles dans le choix de rénovation thermique ou non des propriétaires de maisons individuelles. Pour cela, nous réunirons un panel de 500 propriétaires de maisons individuelles (par institut de sondage). Un questionnaire inspiré de Fischbacher *et al.* (2015) leur sera envoyé, il pourra être rempli en ligne et comprendra trois parties :

- qualité énergétique de la maison, incluant des détails sur la qualité thermique du toit, des fenêtres et murs ; étiquette énergie de leur maison.
- consommation d'énergie : estimation des consommations via notamment l'envoi des factures d'énergie. Si possible, nous essaierons d'obtenir les consommations avant et après travaux dans le cas où des travaux ont été entrepris.
- caractéristiques des propriétaires et leurs préférences individuelles en terme de risque, de préférences temporelles, environnementales et sociales ; leur niveau de revenu.

Ce questionnaire permettra d'identifier quelles préférences individuelles conduisent à la réalisation de travaux de rénovation et selon quel objectif de consommation d'énergie.

Ce travail permettra d'améliorer la compréhension des décisions individuelles pour la rénovation thermique de l'habitat et donc d'évaluer l'impact potentiel de politiques publiques spécifiques. En particulier, l'étude pourra permettre d'évaluer s'il est plus intéressant d'avoir recours à des politiques d'information ou à des politiques de subvention. Certains types de contrats peuvent également être jugés plus adaptés en fonction des préférences qui seront identifiées pour orienter les ménages vers une rénovation thermique de leur logement.

Eléments de bibliographie

Alberini A., Banfi S., Ramseier C. (2013) Energy efficiency investments in the home: Swiss homeowners and expectations about future energy prices, *Energy Journal*, 34(1), pp. 49-86.

Banfi S., Farsi M., Filippini M., Jakob M. (2008) Willingness to pay for energy-saving measures in residential buildings, *Energy economics*, 30(2), pp. 503-516.

Brisepierre G. (2011) Les conditions sociales et organisationnelles du changement des pratiques de consommation d'énergie dans l'habitat collectif. Thèse de doctorat de sociologie, Université de Paris-Sorbonne.

Charlier D. (2012) Les déterminants des investissements économiseurs d'énergie dans le secteur résidentiel français. Thèse de doctorat d'économie, Université de Grenoble.

Fischbacher U., Schudy S., Teyssier S. (2015) Heterogeneous preferences and investments in energy saving measures (N° 2015-11). Munich Discussion Paper.

Gillingham K., Palmer K. (2014) Bridging the energy efficiency gap: policy insights from economic theory and empirical evidence, *Review of Environmental Economics and Policy*, 8(1), pp. 18-38.

Train K. (1985) Discount rates in consumers' energy-related decisions: a review of the literature, *Energy*, 10(12), pp. 1243-1253.

Varenio C. (2012) L'efficacité énergétique dans les bâtiments existants: déficit d'investissement, incitations et accompagnement. Thèse de doctorat d'économie, Université de Grenoble.

II.2. Le citoyen : scénarios, démocratie et transition énergétique

Ce volet du programme de recherche analyse les interactions au sein du triptyque Sciences–Société–Politiques. L'objet « scénario » apparaît comme un élément pouvant prendre une place centrale dans ce triptyque mettant les trois éléments en interaction. Ces réflexions se nourrissent de trois expériences :

- Les travaux entrepris dans le cadre de l'élaboration participative de scénarios bas carbone (voir page 45).
- L'expérience du débat national sur la transition énergétique (DNTE), qui a constitué un cas très intéressant de démocratie délibérative. Il a notamment permis, sur la base d'un inventaire des scénarios existants pour la France, d'élaborer une typologie de 4 stratégies bas carbone. Une de ces stratégies a servi de base à la définition de certains éléments structurants de la Loi TECV (transition énergétique et croissance verte) votée à l'automne 2014.
- L'expérience enrichissante qu'a été ma participation au projet Deep Decarbonization Pathways (voir page 17) dans lequel chaque équipe de recherche nationale construit des scénarios énergétiques nationaux bas-carbone, qui dans certains cas ont fourni une base pour les contributions nationales (INDC) soumises en amont de la COP21.

Ces expériences témoignent d'une opportunité pour de nouvelles méthodes d'élaboration de scénarios (en évoluant de scénarios *output-oriented* vers des scénarios *process-oriented*) pouvant servir d'outil d'aide à la gouvernance et à la démocratie participative ou délibérative à l'échelle locale ou nationale, et permettant de faire dialoguer la science avec la société et les décideurs politiques.

Un des objectifs sera de nourrir les réflexions sur la gestion dynamique des trajectoires de transition bas carbone et plus largement les problèmes de gouvernance de la transition énergétique, et ce à différentes échelles (locale, nationale, européenne ou internationale).

Plus généralement, les travaux s'intéresseront tout d'abord aux configurations possibles du triptyque Sciences–Société–Politique (Edenhofer et Kowarsch, 2012) et à l'adéquation ou non de ces modèles avec les enjeux de gouvernance dans le contexte de la lutte contre le changement climatique et la transition énergétique. L'exemple des difficultés rencontrées lors du processus d'approbation du dernier *Summary for Policymakers* du GIEC témoigne des limites du modèle dans lequel le Groupe 3 du GIEC s'est inscrit jusqu'à aujourd'hui. Certains demandent son évolution (Edenhofer et Minx, 2014). Turnheim *et al.* (2015) montrent également les opportunités à proposer certaines articulations entre science, société et décideurs, afin de faire face aux enjeux de la gouvernance du changement climatique.

La démarche de l'enquête scientifique développée par Dewey (*The Theory of Inquiry*, 1938) dans le cadre d'un modèle pragmatique présente un cadre théorique qui semble rentrer en convergence avec l'expérience française du DNTE. Ce modèle enchaîne la construction : 1/ des problématiques sociétales, 2/ des données et faits observés, 3/ des solutions et 4/ de leur évaluation, et permet de compléter les modèles de sciences-société-politique.

L'insertion de l'enquête scientifique dans le processus démocratique peut se décliner à plusieurs niveaux : comme dans la construction du régime international sur le climat, on a compris que les solutions purement *top-down* (taxe mondiale ou marché mondial des quotas) étaient théoriquement satisfaisantes, mais difficilement applicables. En matière de régime international, il faut d'abord construire l'engagement des Etats puis mettre en œuvre des instruments – taxes ou marchés de quotas – à harmoniser sur la durée. De même, au niveau national, il faut articuler dispositifs délibératifs pour le choix des futurs (DNTE) et décisions gouvernementales pour le choix des moyens et instruments d'incitation (démocratie représentative). Mais les choix nationaux doivent aussi impérativement s'appuyer sur des initiatives locales, terrain de déploiement privilégié, à la fois de certaines solutions techniques et d'une démocratie participative en matière de développement durable. Une structuration multiéchelle de la problématique "démocratie et climat" se dessine alors :

- action locale et démocratie participative ;
- politiques nationales articulant la démocratie représentative et la démocratie délibérative ;
- politiques européennes et gouvernance Commission-Parlement-Conseil ;

- niveau international : lieu de la négociation et de la construction des institutions du régime climatique mondial ;

L'analyse abordera les modalités pertinentes de l'expertise pour chacun de ces 4 niveaux.

Éléments de bibliographie

Brown M. B. (2009) *Science in Democracy: Expertise, Institutions, and Representation*. Cambridge : MIT Press.

Edenhofer O., Kowarsch M. (2012) A pragmatist approach to the science-policy interface. Working paper paper, Mercator Res. Inst. Clim. Change, Berlin.

Edenhofer O., Minx J. (2014) Mapmakers and navigators, facts and values, *Science*, 345(6192), pp. 37-38.

Dewey J. (1927) *The Public and Its Problems*. New York: Henry Hold & Co.

Dewey J. (1986) *Logic: The theory of inquiry*. In : *Later Works of John Dewey 1925-1953*, vol. 12: 1938, ed. Jo A. Boydston. Carbondale and Edwardsville: Southern Illinois University Press.

Gros A. (2011) Les formes de l'enquête historique : John Dewey et Max Weber, *L'Atelier du Centre de recherches historiques* [En ligne], 07 | 2011 <<https://acrh.revues.org/3668>>

Jasanoff S. (1990) *The Fifth Branch: Science Advisers as Policymakers*. Cambridge : Harvard University Press.

Turnheim B., Berkhout F., Geels F., Hof A., McMeekin A., Nykvist B., Van Vuuren D. (2015) Evaluating sustainability transitions pathways: Bridging analytical approaches to address governance challenges, *Global Environmental Change*, 35, pp. 239-253.

Conclusion générale

Lorsque j'ai commencé ma thèse, au début des années 2000, sur l'intégration des pays en développement dans les politiques climatiques, la signature du Protocole de Kyoto était encore récente et ce premier pas laissait entrevoir la possibilité d'aboutir à une coordination internationale effective à terme pour limiter le réchauffement climatique à "un niveau évitant toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique" (objectif ultime de la Convention de Rio, article 2, 1992), et cela sur la base de la mise en œuvre de mécanismes économiques de portée universelle, efficaces et équitables. Près de vingt ans après la signature du Protocole, le niveau de réchauffement à éviter, tel qu'entériné par le récent Accord de Paris est désormais "en dessous de 2°C". Or entretemps (entre 1997 et 2015), les émissions mondiales de gaz à effet de serre ont augmenté de près de 50% et la Conférence de Copenhague s'est soldée par l'incapacité à construire un accord global. Il a alors fallu reconnaître qu'une coordination internationale centrée sur les instruments et qui aurait, à travers un prix unique du carbone, organisé des réductions d'émissions dans tous les pays et tous les secteurs économiques, était impossible à atteindre à court terme.

Malgré la multiplication dans les dernières années de politiques nationales visant à limiter les émissions de GES, les prix du carbone observés – à travers des taxes carbone ou des systèmes de quotas – sont bien insuffisants pour insuffler des réductions d'émissions rapides et conséquentes. La pérennité de ces politiques et la capacité des instruments économiques à jouer un signal de long terme sont soumises aux aléas politiques et économiques. Les solutions préconisées par les économistes se heurtent donc aux aspérités du monde réel et ne sont pas mises en place ou alors de manière non satisfaisante car la lutte contre le changement climatique reste souvent moins prioritaire pour les gouvernements que les enjeux à court terme de compétitivité industrielle internationale, d'emploi ou de pouvoir d'achat. Il est donc urgent que les économistes intègrent ces difficultés dans leurs préconisations. De la même manière dans les pays du Sud, les politiques climatiques et les stratégies de décarbonation ne peuvent être pensées et conçues sans être intégrées au cœur même des enjeux d'éradication de la pauvreté et des autres objectifs de développement durable.

Les conséquences en termes d'orientation de la recherche en économie des politiques climatiques sont importantes. En effet, l'urgence de l'action imposée par le renforcement de l'ambition découlant de l'ampleur des dommages attendus d'un changement climatique mal contrôlé, appellent à un élargissement au-delà du champ disciplinaire strict de l'économie. Nombre des enjeux auxquels la communauté scientifique doit faire face dans le contexte de l'accord de Paris gagneraient à être abordés aussi sous un angle interdisciplinaire. Une des clés de la réussite future de l'Accord de Paris sera la réconciliation entre, d'une part l'approche *bottom-up* des contributions déterminées

nationalement qui seront définies sous contrainte économique et de priorité de développement spécifique de chacun des pays et, d'autre part l'approche *top-down* devant garantir que l'agrégation de ces contributions permettra de rester dans une enveloppe de réchauffement inférieure à 2°C.

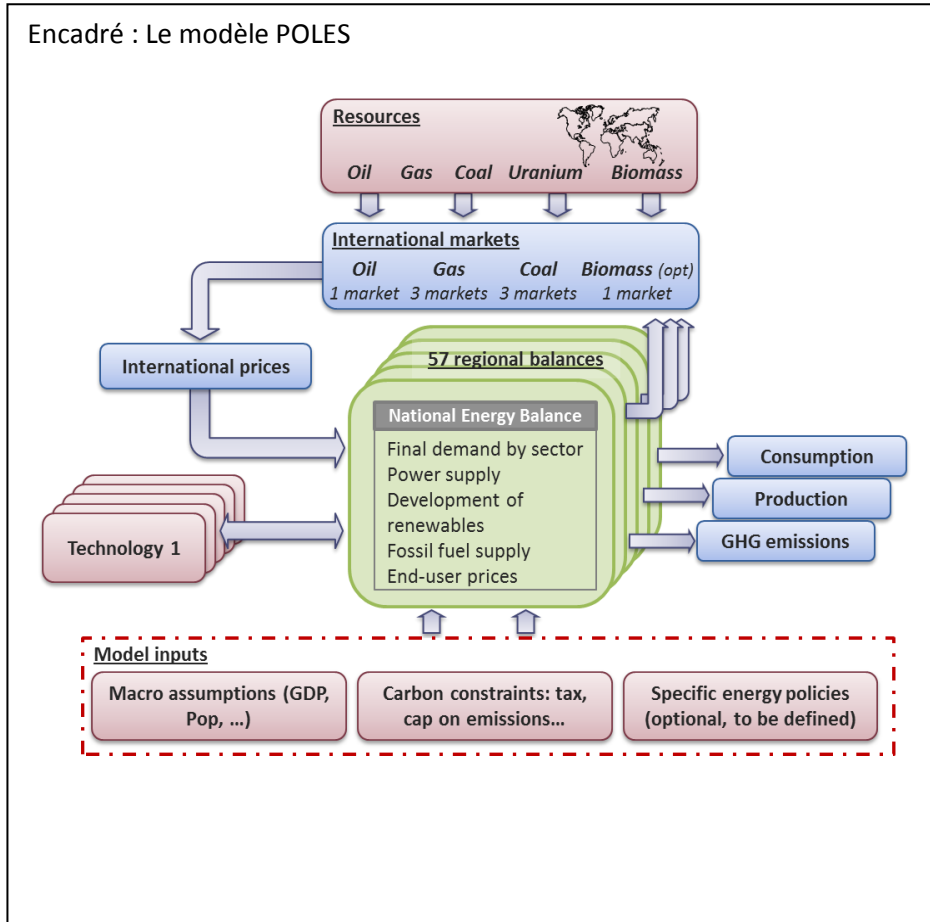
Au cœur de cette nécessaire articulation entre approches *top-down* et *bottom-up* on trouve toutes les questions relatives à la gouvernance multi-échelles. Comment articuler la lutte contre le réchauffement climatique avec les autres dimensions de la gouvernance internationale comme les objectifs du Développement Durable pour une meilleure efficacité ? L'Accord de Paris mentionne dans son préambule l'importance de l'action de tous les secteurs de la société civile (y compris les villes, autorités infranationales, le secteur privé, les communautés locales...). Quel rôle leur donner, comment mieux connaître les effets leviers de chacune de ces communautés et quels sont les enjeux de la gouvernance multi-échelles de la lutte contre le changement climatique ? Comment aussi mieux intégrer la question des impacts et de l'adaptation dans les recherches menées sur l'atténuation du changement climatique ?

Par ailleurs, un des enjeux centraux pour des politiques climatiques efficaces est la diminution du coût et l'accélération de la pénétration des technologies bas carbone. Comment mieux comprendre les trajectoires d'innovation pour les technologies bas carbone et mieux intégrer par exemple les phénomènes de *spillovers* intersectoriels pour affiner la compréhension des processus d'innovation dans les technologies bas carbone (une thèse sous ma direction devrait débiter sur cette question de recherche spécifique en octobre 2016) et pouvoir opérer un meilleur pilotage de la R&D et une meilleure coordination des politiques pour un progrès technique bas carbone "à marche forcée".

Mes travaux passés seront donc prolongés sur des thématiques renouvelées permettant d'explorer plusieurs de ces questionnements. Ma participation notamment à différentes projets et instances promouvant l'interdisciplinarité ou mon initiative de création d'une école thématique nationale et annuelle sur les enjeux interdisciplinaires de la recherche sur le changement climatique s'inscrivent également dans cette dynamique.

Annexe

Encadré : Le modèle POLES



- Modèle *Bottom-up* du système énergétique avec choix technologiques explicites et décisions économiques cohérentes des agents
- Construction modulaire, avec modules pour chaque secteur d'offre et de demande sur 56 pays
- Prix des énergies endogènes avec une description explicite des fondamentaux de chaque marché international et une représentation détaillée des contraintes de ressources
- Simulations récursives : ajustements progressifs des variables d'offre et de demande d'une part, et des prix, d'autre part
- Coûts, performances et *learning curves* explicites pour une vingtaine de technologies
- Derniers travaux :
 - Endogénéisation du progrès technique - AMPERE, ADVANCE
 - Coûts d'opportunité des technologies (ou surcoût du non-déploiement) - Energy Modeling Forum, AMPERE
 - À l'IPTS, rapport Global Energy and Climate Outlook (GECO 2015) avant COP 21 pour la DG-Climat Action