

Incertitudes et inerties au coeur de la question climatique: Explorations numériques en économie du changement climatique

Céline Guivarch

► To cite this version:

Céline Guivarch. Incertitudes et inerties au coeur de la question climatique: Explorations numériques en économie du changement climatique. Economies et finances. Université Paris Est, 2017. tel-01654151

HAL Id: tel-01654151

<https://halshs.archives-ouvertes.fr/tel-01654151>

Submitted on 6 Dec 2017

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.

**Incertitudes et inerties au cœur de la question climatique:
*Explorations numériques en économie du changement climatique***

Dossier de demande d'inscription à l'Habilitation à Diriger des Recherches
Sciences Economiques
Université Paris-Est

Céline Guivarch

Directeur d'habilitation : Philippe Quirion

Soutenue le 19 avril 2017

Jury

Michel Colombier – rapporteur
Gaël Giraud – rapporteur
Philippe Quirion – directeur d'habilitation
Lionel Ragot – président du jury
Katheline Schubert – rapporteur

Table des matières

I.	Curriculum Vitae détaillé.....	3
II.	Présentation et synthèse des travaux	14
1.	Préambule.....	14
2.	Introduction : irréversibilités, incertitudes et économie du changement climatique.....	16
2.1.	Incertitudes et irréversibilités.....	18
2.2.	Scénarios	19
2.3.	Modèles.....	21
3.	Irréversibilités et inerties, implications pour les politiques d'atténuation	25
3.1.	Investigation stylisée de la question de l'inertie à l'atténuation	26
3.2.	Les infrastructures dans les trajectoires de décarbonisation de l'économie	30
3.3.	Articulation court-terme long-terme	36
4.	Incertitudes dans les modèles et scénarios pour l'évaluation des trajectoires d'émissions de GES et des politiques climatiques	39
4.1.	Modèles, scénarios et incertitudes : contributions méthodologiques.....	40
4.2.	Modèles, scénarios et incertitudes : résultats pour l'analyse des trajectoires d'émissions et des politiques d'atténuation	46
III.	Perspectives de recherche.....	57
1.	Vers une évaluation (plus) intégrée prenant (mieux) en compte les incertitudes pour informer la décision	57
1.1.	Informer des cadres de décision alternatifs à l'utilité espérée	57
1.2.	Prendre en compte les dommages - incertitude, irréversibilité, niveau : qu'est-ce qui compte ?	59
2.	Eléments d'évaluation de l'architecture internationale climatique	60
2.1.	Des contributions nationales trop peu ambitieuses à court-terme ? – Approche dynamique et articulation court-terme long-terme	60
2.2.	Des contributions nationales fragmentées donc non coût-efficaces ? – La question de la différenciation	61
IV.	Bibliographie.....	65

I. Curriculum Vitae détaillé

CELINE GUIVARCH

Ingénieur en Chef des Ponts, Eaux et Forêts

Docteur en économie

Chercheur à l'Ecole des Ponts ParisTech, UMR CIREN

Née le 23 juin 1980, mariée, 2 enfants

Tél : 01.43.94.73.20 – Fax : 01.43.94.73.70 – guivarch@centre-cired.fr

Page personnelle : <http://www2.centre-cired.fr/Equipe/Chercheurs/GUIVARCH-Celine/>

Page scholar : <https://scholar.google.fr/citations?user=pfFQYhcAAAAJ&hl=fr&oi=ao>

Page researchgate: https://www.researchgate.net/profile/Celine_Guivarch

Diplômes et titres universitaires:

- Doctorat en Economie, Ecole Doctorale VTT, Ecole des Ponts ParisTech, Université Paris-Est (2010).
- Mastère d'Action Publique, Ecole des Ponts ParisTech (2006).
- Diplôme d'ingénieur de l'Ecole des Ponts et Chaussées (2005).
- Diplôme d'ingénieur de l'Ecole Polytechnique (2004).

Langues :

- Français
- Anglais (courant)
- Russe (intermédiaire)
- Chinois (scolaire)

Déroulement de carrière:

2012-... *Ecole des Ponts ParisTech, CIREN* – Chercheur

2010-2011 *Agence Internationale de l'Energie – Climate Change Unit* – Expert

2006-2010 *CIREN* – Doctorant

- Thèse « *Les coûts de l'atténuation du changement climatique dans un monde de second rang* » (soutenue le 22 octobre 2010, Directeur de thèse : J.-C. Hourcade, Président du jury : L. Goulder, Rapporteurs : F. Lecocq et M. Jaccard, Examineur : P.-N. Giraud).

2006 *Ambassade de France au Kazakhstan –Service de Coopération et d'Action Culturelle*
• Etude « *Dynamiques du secteur de l'eau au Kazakhstan – Quelles politiques de coopération dans le domaine de l'eau et de l'assainissement entre la France et le Kazakhstan ?* » (Rapport de thèse professionnelle du Master d'Action Publique, tuteur académique : B. Barraqué).

2004-2005 *Sofreco* – *Coordinatrice régionale d'un projet européen d'assistance technique*
• Projet TACIS “*Assistance Technique aux pays d'Asie Centrale dans le cadre de leurs engagements en terme de changement climatique*” - modélisation technico-économique (MARKAL) ; analyse des stratégies de réduction des émissions de gaz à effet de serre ; mise en place de projets MDP.

1. Développement des connaissances

En grisé les publications de (ou issues de) la thèse, en gras les publications qui font l'objet du bilan des travaux dans ce dossier de demande d'habilitation à diriger des recherches

Articles dans des revues avec comité de lecture :

Internationales

- [1] Guivarch, C., Monjon, S., 2016. "Identifying the main uncertainty drivers of energy security in a low-carbon world: The case of Europe". *Energy Economics* (in press).
- [2] Berry, A., Jouffe, Y., Coulombel, N., Guivarch, C., 2016. Investigating fuel poverty in the transport sector: Toward a composite indicator of vulnerability, *Energy Research and Social Science* (in press).
- [3] Guivarch, C., Rozenberg, J., Schweizer, V., 2016. The diversity of socio-economic scenarios: Insights from the investigation of a scenarios database, *Environmental Modelling & Software* Volume 80, Pages 336–353.
- [4] Trutnevyte, E., Guivarch, C., Lempert, R., Strachan, N. 2016. Reinvigorating the scenario technique to expand uncertainty consideration. *Climatic Change* 135 (3), pages 373-379.
- [5] Gasser, T., Guivarch, C., Tachiiri, K., Jones, C.D., Ciais, P. 2015. Negative emissions physically needed to keep global warming below 2°C. *Nature Communications* 10.1038/ncomms8958.
- [6] Guivarch, C., Monjon, S., Rozenberg, J., Vogt-Schilb, A. 2015. Would climate policies improve the European energy security?. *Climate Change Economics* 06, 1550008.
- [7] Branger, F., Giraudet, L.-G., Guivarch, C., Quirion, P. 2015. Global sensitivity analysis of an energy–economy model of the residential building sector. *Environmental Modelling & Software* Volume 70, Pages 45–54.
- [8] Rozenberg, J., Guivarch, C., Lempert, R., Hallegatte, S. 2014. Building SSPs for climate policy analysis: a scenario elicitation methodology to map the space of possible future challenges to mitigation and adaptation. *Climatic Change* 122(3), pp 509-522.
- [9] Guivarch, C. and Hallegatte, S. 2013. '2°C or not 2°C?' *Global Environmental Change* 23(1): 179-192.
- [10] Waisman, H.D., Guivarch, C., Lecocq, C. 2013. 'The transportation sector and low-carbon growth pathways' *Climate Policy* 13(1): 106–129.
- [11] Waisman, H.D., Guivarch, C., Grazi, F., Hourcade, J.-C. 2012. 'The Imaclim-R Model: Infrastructures, Technical Inertia and the Costs of Low Carbon Futures under Imperfect Foresight.' *Climatic Change* 114(1): 101-120.
- [12] Guivarch, C., Mathy, S. 2012. 'Energy-GDP decoupling in a second best world—a case study on India.' *Climatic Change* 113(2): 339-356.
- [13] Giraudet, L.-G., Guivarch, C., Quirion, P. 2012. 'Exploring the potential for energy conservation in French households through hybrid modelling.' *Energy Economics* 34(2): 426–445.
- [14] Giraudet, L.-G., C. Guivarch, P. Quirion, 2011, 'Comparing and combining energy saving policies. Will proposed residential sector policies meet French official targets ?' *The Energy Journal* 32: 213-242.
- [15] Guivarch, C., Hallegatte, S. 2011. 'Existing infrastructure and the 2°C target'. *Climatic Change* 109:801–805.
- [16] Hamdi-Cherif, M., Guivarch, C., Quirion, P. 2011. 'Sectoral targets for developing countries: Combining "Common but differentiated responsibilities" with "Meaningful participation".' *Climate Policy* 11: 731–751.

- [17] Guivarch, C., Crassous, R., Sassi, O., Hallegatte, S. 2011. 'The costs of climate policies in a second best world with labour market imperfections'. *Climate Policy* 11: 768–788.
- [18] Rozenberg, J., Hallegatte, S., Vogt-Schilb, A., Sassi, O., Guivarch, C., Waisman, H., Hourcade, J.-C. 2010. 'Climate change and energy security: climate policies as a hedge against the uncertainty on future oil supply'. *Climatic Change* 101(3-4): 663-668.
- [19] Sassi O., Crassous R., Hourcade J.-C., Gitz V., Waisman H., Guivarch C., 2010. 'Imacliim-R: a modelling framework to simulate sustainable development pathways', *International Journal of Global Environmental Issues*, Special Issue on Models for Sustainable Development for Resolving Global Environmental Issues 10(1-2): 5–24.
- [20] Mathy, S., Guivarch, C. 2010. 'Climate policies in a second-best world - A case study on India', *Energy Policy* 38(3): 1519-1528.
- [21] Guivarch, C., Hallegatte, H., Crassous, R., 2009, 'The resilience of the Indian economy to rising oil prices as a validation test for a global energy–environment–economy CGE model', *Energy Policy* 37(11): 4259–4266.

Nationales

- [22] Cassen, C., Guivarch, C., Lecocq, F. 2015. **Les cobénéfices des politiques climatiques : un concept opérant pour les négociations climat ?**. *Natures Sciences Sociétés*, 23, supplément, S41-S51.
- [23] Guivarch, C., Cassen, C. 2015. L'atténuation du changement climatique: retour sur le 5e rapport du Giec. *La Météorologie* 88, 97-105.
- [24] Guivarch, C. et Rozenberg, J. 2014. **Produire des scénarios par centaines. Comment les démarches statistiques renouvellent les approches prospectives**. *Futuribles* 398, 49-56.
- [25] Guivarch, C., Rozenberg, J. 2013. **Les nouveaux scénarios socio-économiques pour la recherche sur le changement climatique**. *Pollution Atmosphérique, Climat, santé, société*. N° spécial climat - Juin 2013.

Contributions à des ouvrages :

- [26] Guivarch, C., Rozenberg, J., Cassen, C. and Hourcade, J.C. 2014. 'Energy, Environment and Sustainable Globalisation', in (Eds) J. Eatwell, T. McKinley and P. Petit, *Challenges for Europe in the World, 2030*, Ashgate, UK.
- [27] Hamdi-Cherif, M., Guivarch, C., Quirion, P. 2011. 'Une approche sectorielle pour la production d'électricité dans les pays en développement: enseignements du modèle Imacliim-R', in *Economie du climat, pistes pour l'après-Kyoto* (Eds. Godard, O. and J.P. Ponsard), Les éditions de l'Ecole Polytechnique, Palaiseau, France.

Autres publications :

- [28] Boucher, O., Bellassen, V., Benveniste, H., Ciais, P., Criqui, P., Guivarch, C., Le Treut, H., Mathy, S., Séférian, R., 2016. "Opinion: In the wake of Paris Agreement, scientists must embrace new directions for climate change research". *PNAS* vol. 113 no. 27, 7287–7290.
- [29] Guivarch, C., Mejean, A., Pottier, A., Fleurbaey, M., 2016. "Social cost of carbon: global duty", *Science* 351 (6278): 1160 61. [Lettre à l'éditeur]
- [30] Guivarch, C., Pottier, A. 2015. Climate damages on production or on growth: what impact on the social cost of carbon. FAERE Working Paper, 2015.15.
- [31] Audoly, R., Vogt-Schilb, A., Guivarch, C. 2014. Pathways toward Zero-Carbon Electricity Required for Climate Stabilization. World Bank Policy Research Working Paper 7075.

- [32] Demailly, D., Chancel, L., Waisman, H., Guivarch, C. 2013. A post-growth society for the 21st century. Does prosperity have to wait for the return of economic growth?, Studies n°08/13, Iddri, Paris, France, 76 p.
- [33] Guivarch, C. and H. Heidug, 2013. Bioenergy with carbon capture and storage: the negative emission concept, in Electricity in a Climate Constrained World 2012 - Data and analyses, International Energy Agency, OECD/IEA Publications, Paris, France.
- [34] Guivarch, C., Hood, C. 2011. 'Early retirement of coal-fired generation in the transition to low-carbon electricity systems', in Climate and electricity annual 2011- Data and analyses, International Energy Agency, OECD/IEA Publications, Paris, France.

Communications:

- Communications invitées

- [Four dilemmas for an economy-energy-environment economist/modeler](#), Journées doctorales ABIES, 15 avril 2016.
- Modeling Climate Impact on Economic Growth: More Harm, More Uncertainty or None of the Above? Numerical Experiments and Implications for Mitigation Policy, [Princeton, Climate Futures Initiative, Spring 2015 seminar series](#), April 22, 2015.
- Climate change mitigation costs: what can we learn from a large number of scenarios? Invited speaker at the [Alliance Summer School in Science and Policy 2014](#), "Climate Change Research : The Nexus of Natural and Social Science". Paris, July 7, 2014.
- Recent work at Cired in the "Framework for the Development of New Socio-economic Scenarios for Climate Change Research", Science for Energy Scenarios, Ecole de Physique des Houches, February 2-7, 2014.
- Changement climatique, technologies, économie et société, 12e Forum Mondial du Développement Durable, Paris, 3-4 mars 2014.
- Modeling experiments with Imacim-R - Hybrid general equilibrium and oil depletion, at: Energy: The Next Systemic Risk to Banking? - High level seminar co-hosted by the Institute of International and European Affairs and ASPO, Irlande (2012).

- Colloques de recherche

Avec actes

- Trutnevyte, E., Guivarch, C. 2014. Innovative techniques for quantitative scenarios in energy and environmental research: a review. In: Ames, D. P., Quinn, N. W. T., Rizzoli, A. E. (Eds.), 7th International Congress on Environmental Modelling and Software Proceedings, 15-19 June 2014, San Diego, USA.
- **Guivarch, C., Schweizer, V., Rozenberg, J. 2014. Enhancing the policy relevance of scenarios through a dynamic analytical approach. In: Ames, D. P., Quinn, N. W. T., Rizzoli, A. E. (Eds.), 7th International Congress on Environmental Modelling and Software Proceedings, 15-19 June 2014, San Diego, USA.**

Sans actes

- A methodology to investigate the diversity of socio-economic pathways with similar outcomes, 8th Annual Meeting of the IAMC, Potsdam, Germany, November 16-18, 2016.
- Building and analyzing large numbers of socio-economic scenarios for decision support under uncertainty: a modelling experiment to explore the main determinants of economic growth in a carbon-constrained world, Our common future under climate change conference, Paris, July 7-10, 2015.

- Global warming as a non-uniform public bad: A generalization of the differential game model, AFSE conference, Rennes, June 22, 2015.
- "The cost of climate change mitigation: uncertainties and metrics matter", European Economic Association Congress, Toulouse, France, August 25-29, 2014.
- "Would climate policy improve the European energy security?", World Congress of Environmental and Resource Economists, Istanbul, Turkey, 28 June-2 July 2014
- "Climate change mitigation costs: a tale of uncertainties, metrics and misleading baselines", RAND seminar, RAND, Santa Monica, CA, USA, 20 June 2014
- "Abatement strategies against uncertainty and variability of climate change damages". Workshop Equity and Risk in Integrated Assessment Models, Fondation Maison des Sciences de l'Homme, Paris, May 19-20, 2014.
- Enhancing the policy relevance of scenarios through a dynamic analytical approach, Workshop IQ SCENE : Innovative techniques for Quantitative SCenarios in ENergy and Environmental research, London, 26-27 March 2014.
- Will climate policy improve European energy security ?, GTAP 16th Annual Conference on Global Economic Analysis "New Challenges for Global Trade in a Rapidly Changing World", Shanghai, China, June 12-14, 2013.
- Enhancing the policy relevance of scenario studies through a dynamic analytical approach using a large number of scenarios, International Energy Workshop, Paris, France, June 19-21, 2013.
- Recent Work on SSPs and Challenges to Mitigation, Adaptation, IPCC Working Group II and III co-sponsored meeting on "New Socio- economic Pathways for Climate Change Research", Pays-Bas (2012). (with V. Schweizer and J. Rozenberg)
- 2°C or not 2°C?, Planet Under Pressure, London, March 26-29, 2012.
- A scenario elicitation methodology to map the space of possible future mitigative and adaptative capacity, Workshop on the New Socioeconomic Pathways for Climate Change Research, États-Unis (2011). (with J. Rozenberg, R. Lempert, S. Hallegatte)
- The costs of climate policies in a second best world with labour market imperfections, World Congress of Environmental and Resource Economists, Montreal, June 28 - July 2, 2010.
- What if energy decoupling of emerging economies was not so spontaneous? An illustrative example on India, International Scientific Congress on Climate Change, Copenhagen, March 10-12 march, 2009.
- Hybrid Modeling of Economy-Energy-Environment Scenarios The Impact of China and India's Economic Growth on Global Economy and Energy Use, Conference on the International Dimensions of Climate Policies, University of Bern, Bern, Switzerland, January 21 – 23, 2009.
- The Resilience of the Indian Economy to Rising Oil Prices as a Validation Test for a Global Energy-Environment-Economy CGE Model, Conference on the International Dimensions of Climate Policies, University of Bern, Bern, Switzerland, January 21 – 23, 2009.
- Carbon intensive pathways revisited – Insights from the Imaclim-R modeling framework, International Energy Workshop, Stanford, June 27, 2007.

Séminaires de recherche :

- Séminaire invité au Laboratoire Interdisciplinaire des Energies de Demain. "Exploration des liens entre croissance, énergie et émissions de gaz à effet de serre - modèles, scénarios, incertitudes". Paris, September 30, 2014.
- Abatement strategies against uncertainty and variability of climate change damages. Workshop Equity and Risk in Integrated Assessment Models, Fondation Maison des Sciences de l'Homme, Paris, May 19-20, 2014.

- Évaluer les coûts des politiques climatiques avec le modèle hybride Imaclim-R. Le rôle des infrastructures, de l'inertie du capital technique et des anticipations imparfaites, séminaire de Recherches en Economie de l'Energie, Mines ParisTech, Dauphine, PSL*, 9 octobre 2013.
- Evaluer le coût des politiques climatiques - de l'importance des mécanismes de second rang. Séminaire du Laboratoire d'Economie Forestière, Nancy, 11 février 2011.
- Imaclim-R: an innovative hybrid model to foster the dialog on sustainable pathways, energy policies and climate stabilization. Seminar of PBL, Utrecht, Netherlands, February 11, 2010. (with M. Hamdi-Cherif)

Relectures pour revues :

- Climatic Change, Energy Policy, Climate Change Economics, Energy Economics, Economie et Prévision.
- Relecteur pour le 5ème rapport du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (Groupe 3 « Atténuation du Changement Climatique », chapitres 5 « Drivers, Trends and Mitigation » et 6 « Assessing Transformation Pathways »).

2. Transfert, application et valorisation des connaissances

Articles dans revues technico-professionnelles :

- Berry, A., Jouffe, Y., Guivarch, C., Coulombel, N. 2015. Comment mesurer la précarité énergétique en matière de transport. La Revue de l'Énergie n° 625, 203-209.
- Audoly, R., Vogt-Schilb, A., Guivarch, C. 2014. Pathways toward Zero-Carbon Electricity Required for Climate Stabilization. World Bank Policy Research Working Paper 7075.
- Guivarch, C. 2014. Changement climatique, technologies, économie et société. *Passages* n°179.
- Vogt-Schilb, A., Guivarch, C., Hourcade, J.C. 2013. Les véhicules électrifiés réduiront-ils les émissions de carbone ? *Revue de l'Energie* 611 (janvier/février): 5-11.

Contrats; rapports de recherche :

- Projet EU-FP7 ADVANCE, Advanced Model Development and Validation for the Improved Analysis of Costs and Impacts of Mitigation Policies, 2013-...
- Institut de la Mobilité Durable, Fondation Renault-ParisTech, Axe "vision mondiale", 2010-...
- Guivarch, C., Monjon, S., Rozenberg, J., Vogt-Schilb, A. 2012. Rapport final du projet ELIPSE « Evaluer Les Interactions entre Politique climatique et Sécurité énergétique en Europe », Conseil Supérieur de la Formation et de la Recherche Stratégique.
- Guivarch C., Rozenberg J., Cassen C., Hourcade J.-C. 2012. Scenarios to investigate the interplay between energy, environment and sustainable globalization, Rapport final du projet européen (FP7) Challenges for Europe in the world in 2030, AUGUR, Project no. SSH - CT - 2009 – 244565.
- Guivarch C., Rozenberg J., Cassen C. 2012. Scenario analysis: perspectives for energy, emissions and mitigation of climate change, Rapport de recherche dans le cadre du projet européen (FP7) Challenges for Europe in the world in 2030, AUGUR, Project no. SSH - CT - 2009 – 244565.

- Guivarch, C. and J. Rozenberg, 2011. Short-term/Long-term coherence of emissions reduction pathways, in *Is there a case for the EU moving beyond 20% GHG emissions reduction target by 2020?*, Climate Strategies, c/o University of Cambridge, UK.
- Guivarch C., Rozenberg J., Cassen C., Hourcade J.-C. 2011. Main challenges for the role of Europe in global governance on energy and environmental issues: prospective analyses and scenarios, *Rapport de recherche dans le cadre du projet européen (FP7) Challenges for Europe in the world in 2030*, AUGUR, Project no. SSH - CT - 2009 – 244565.
- Giraudet, L.-G., Guivarch, C., Quirion, P. 2010. Evaluation des mesures du Grenelle de l'environnement sur le parc de logements français : Impact des mesures existantes et supplémentaires sur la consommation de chauffage, *Rapport pour le Commissariat général au développement durable*.
- Cassen C., Guivarch C., Hourcade J.-C. , Rozenberg J. 2010. Methodology to solve the aggregation problem between energy and trade and macro economic data in global models, *Rapport de recherche dans le cadre du projet européen (FP7) Challenges for Europe in the world in 2030*, AUGUR, Project no. SSH - CT - 2009 – 244565.
- Hamdi-Cherif, M., Guivarch, C., Cassen, C. 2010. Exploration du triptyque croissance-prix du carbone-prix des énergies fossiles avec le modèle Imacim-R – *Rapport de synthèse*, Partenariat CIRED-EDF 2010.
- Combet, E., Gherzi, F. Guivarch, C. 2009. Les transports et le Facteur 4 - Entre diversification des signaux et réforme fiscale, *Rapport de Recherche du Programme de Recherche et d'Innovation dans les Transports Terrestres*.
- Mathy, S., Guivarch, C. 2007. Climat et développement : Réconciliation entre contraintes environnementales et politiques nationales de développement dans les PED, *Rapport de Recherche du Programme Gestion et Impacts du changement climatique*, Ministère de l'Écologie, du développement Durable, du Transport et du Logement.
- Crassous, R., Gitz, V., Guivarch, C., Sassi, O., Waisman, H.-D. 2007. Définition et développement d'un jeu de scénarios décrivant les émissions et les capacités de séquestration de GES et d'aérosols, au niveau mondial, d'origine anthropique, sur la durée du XXIème siècle, *Rapport pour l'Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique*, Ministère de l'Écologie, du développement Durable, du Transport et du Logement.

Conseils, expertises:

- Membre du Conseil économique pour le développement durable.
- Membre du Groupe Interdisciplinaire pour l'évaluation des Contributions Nationales, expertise auprès du MEDDE dans le cadre de la COP21.
- Membre de la délégation française à la 39^{ème} Assemblée Générale du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat pour l'approbation du Résumé pour décideurs du 3^e groupe de travail (Berlin, 7-12 avril 2014).
- Expert pour le projet « Climate change modelling information », European Commission DG Climate Action (2014-2016).
- Membre de la délégation française à la 31^{ème} Assemblée Générale du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (Bali, 2009).

Rapports d'expertise :

- Giraudet, L.-G., C. Guivarch, P. Quirion, L. Penot-Antoniou, 2011, «Evaluation des mesures du Grenelle de l'Environnement sur le parc de logements», *Etudes et Documents* , n°58, Commissariat Général au Développement Durable. ISSN: 2102-4723.

Articles, conférences et documents de vulgarisation

- Contribution à l'exposition « Climat, l'expo à 360° », Cité des Sciences, interview : [Le dérèglement climatique vu par...](#), UniverscienceTV.
- Participation au [train du climat](#), événement national de la fête de la science 2015.
- Co-signature avec un groupe interdisciplinaire d'une tribune dans le Huffington Post : [Les contributions nationales soumises ? la COP21 appellent à une révision et un suivi des émissions.](#)
- Co-signature avec un groupe interdisciplinaire d'une tribune dans le Monde : [COP21 : Pour rejoindre rapidement une trajectoire limitant le réchauffement à 2 °C](#), 08/12/15.
- « Scénarios d'atténuation au niveau mondial », Séminaire CIREN-ONG Aspects économiques du changement climatique, 28 mai 2015.
- Contribution au site "Le Climat en Questions" : écriture de l'article « [Comment les scénarios climatiques prennent-ils en compte les options économiques de nos sociétés ?](#) »
- Guivarch, C., Hallegatte, S. 2012. '2°C or not 2°C', dans Le Livre Blanc Climat 2012, L'entreprise, les politiques et les citoyens face au changement climatique, 12 visions d'experts (Eds. O. Guy).
- Rencontres CNRS Jeunes « Sciences et citoyens ». Atelier « La crise économique, une chance pour l'environnement ? ». Palais des congrès du Futuroscope de Poitiers. 6-8 novembre 2009.
- Bilan de la conférence de Durban sur le climat. Interview sur Universcience TV. 16 décembre 2011.

3. Participation à la formation

Responsabilité de cours

- Eléments de modélisation prospective, parcours modélisation prospective, Master Economie de l'Energie de l'Environnement et des Transports (20h). (2015-...)
- Economie de l'Energie et de l'Environnement, Ecole des Ponts ParisTech, Master Politiques et Action Publique pour le Développement Durable (30h). (2012-...)
- Actualités économiques sur l'énergie et l'environnement, Ecole des Ponts ParisTech, Master Action Publique (30h). (2010-2011)

Interventions dans des modules d'enseignement

- Changement climatique et calcul économique, 2x2h30 dans le cours « Initiation au calcul économique », 1^{ère} année cursus Ingénieur, Ecole des Ponts ParisTech. (2016-...)
- Les scénarios du changement climatique pour le prochain siècle - scénarii économiques-, Ecole de Printemps MedNet, Aix-en-Provence, 9 juin 2015
- Coûts économiques et opportunités de l'atténuation et de l'adaptation., Défi climat 2015 - Quel(s) modèle(s) de développement face aux enjeux climatiques ?, Institut de la gestion publique et du développement économique (9 avril 2015)
- « Les Scénarios du GIEC », 3h dans le cours « Prospective pour l'environnement et le Développement Durable », MPAPDD-MSPPSE AgroParisTech (2014)
- Les enjeux de la transition énergétique, de l'échelle globale à l'échelle locale (3h, partagées avec Vincent Viguié), séminaire de formation à Garges-les-Gonesses, dans le cadre du partenariat avec l'Ecole des Ponts ParisTech (2014)

- « Modélisation prospective énergie-climat », cours d'économie de l'énergie et de l'environnement, formation d'ingénieurs ENPC. (2013-...)
- «Négociations climat : Kyoto et après ? » et « Modélisation hybride », dans Changement Climatique, Ecole des Ponts ParisTech, Master Transport et Développement Durable (2x3h). (2010-...)
- «Négociations climat : Kyoto et après ? » et « Modélisation hybride », dans Economie de l'Environnement, ENSTA ParisTech, cursus ingénieur 3A (une ou deux interventions de 3h selon les années). (2010-2013)
- « Economie du changement climatique – enjeux et controverses », dans Semaine Changement Climatique, Ecole des Hautes Etudes en Santé Publique – Mines ParisTech, Master Spécialisé Santé et environnement (intervention de 3h). (2011-2013)
- « Modeling energy-economy-environment interactions », dans The science, economics, policies and politics of climate change, SciencesPo, Master Economics and Public Policy (intervention de 3h, en anglais). (2012)

Encadrement de chercheurs:

- Encadrement de post-doctorants

- Eoin O Broin, post-doctorant sur le contrat ADVANCE “Advanced Model Development and Validation for the Improved Analysis of Costs and Impacts of Mitigation Policies” (2014-...)

- Co-encadrement de doctorants

- Juan Fernando Vera, Ecole doctorale ABIES AgroParisTech, doctorant en économie au CIRED, sujet de thèse « Choix de technologies bas CO₂ dans l'industrie automobile : effets d'inerties de l'écosystème et incidence des politiques publiques ». thèse CIFRE Renault (2015-...). Directeur de thèse : Franck Lecocq.
- Audrey Berry, Ecole doctorale Territoire, Société, Développement EHES, doctorante en économie au CIRED, sujet de thèse «Induction des précarités énergétiques : analyse des déterminants au croisement des dynamiques géographiques, techniques et socio-économiques». Thèse ADEME (2015-...). Directeur de thèse : Philippe Quirion.
- Manon Solignac, Ecole doctorale VTT, doctorante en économie au CIRED, sujet de thèse : « Innovation, infrastructure et formes urbaines : Quel portefeuille de politiques pour réduire les émissions de gaz à effet de serre dues à la mobilité des ménages en ville ? ». (2012-...). Directeur de thèse : Franck Lecocq.
- Adrien Vogt-Schilb, Ecole doctorale VTT, doctorant en économie au CIRED, sujet de thèse : « Modéliser les délais de mise en place des infrastructures et des capacités de production : application à la coordination comme composante des politiques climatiques ». (2010-2015). Directeur de thèse : Jean-Charles Hourcade. Thèse soutenue le 3/11/2015.

- Encadrement de mémoires de M2 ou mémoire fin d'étude

- Audrey Berry, La précarité/vulnérabilité énergétique dans la dimension transport, Master Economie de l'Environnement et des Ressources Naturelles de TSE. (2014)
- Corentin Lemaire, Dommages stochastiques dans un modèle d'évaluation intégrée du changement climatique, Master d'Economie industrielle, mention Energie Finance Carbone de Paris-Dauphine. (2014)

- Antonin Cura, Faut-il attendre les éoliennes avant d'investir dans le VE ? Adapter l'analyse cycle de vie à une économie en transition énergétique, année de césure ENSTA-ParisTech. (2014)
 - Eloïs Divol, Scénarios prospectifs et données historiques : mise en place d'un algorithme pour identifier des « analogues » historiques aux trajectoires d'émissions de CO₂ futures, Master Economie du Développement Durable, de l'Environnement et de l'Energie. (2012)
 - Manon Solignac, Scénarios de déploiement des véhicules électrifiés et calcul de valeurs d'option du point de vue sociétal, Master Economie du Développement Durable, de l'Environnement et de l'Energie. (2012)
 - Emmanuel James, Représentation des dynamiques d'investissement dans un modèle hybride Economie – Energie – Environnement, Projet Personnel en Laboratoire, ENSTA ParisTech.(2010)
- ***Tuteur académique de stages de fin d'étude***
- Thomas Welsch, Comment l'AFD peut-elle concourir à la transition énergétique dans les PED et développer son portefeuille de projets sur cette thématique ?, thèse professionnelle à l'AFD, Master Politiques et Action Publique pour le Développement Durable, Ecole des Ponts ParisTech Agro-ParisTech. (2014)
 - Pierre Boutot, Comment assurer la sécurité d'approvisionnement en électricité ?, étude des mécanismes de capacités en Europe, thèse professionnelle à Areva, Master Politiques et Action Publique pour le Développement Durable, Ecole des Ponts ParisTech Agro-ParisTech. (2014)
 - Eloïs Divol, Enjeux des énergies renouvelables dans le massif des Pyrénées, thèse professionnelle à la DATAR Pyrénées, Master Politiques et Action Publique pour le Développement Durable, Ecole des Ponts ParisTech Agro-ParisTech. (2013)
 - Eric Grondin, Analyse et méthodologie de suivi des opérations de réhabilitation énergétique dans le cadre de la convention EDF/ES/CG67, thèse professionnelle au sein de la Direction de l'Habitat du Conseil Général du Bas-Rhin, Master d'Action Publique, Ecole des Ponts ParisTech. (2012)
 - Jean-Christophe Braun, Les outils d'aide à la décision au service de l'action publique – application aux Plans Climat-Energie Territoriaux, thèse professionnelle à 2EI, Master d'Action Publique, Ecole des Ponts ParisTech. (2012)
 - Marie Pausader, Négociations internationales sur le climat : niveau d'ambition et perspectives, thèse professionnelle au MEDDTL, Direction des Affaires Européennes et Internationales, Master d'Action Publique, Ecole des Ponts ParisTech. (2011)

4. Administration de la recherche

Responsabilités de projet de recherche

- Projet Européen ADVANCE (FP7) (2013-...)
- Projet axe « Vision globale » de l'Institut de la Mobilité Durable, partenariat Renault-ParisTech (2010-...)
- Projet Européen AUGUR (FP7) (2009-2013)
- Projet ELIPSE, Conseil Supérieur de la Formation et de la Recherche Stratégique (national) (2011-2013)

- Partenariat EDF-Cired, Exploration du triptyque croissance-prix du carbone-prix des énergies fossiles (2010)
- Projet Les transports et le Facteur 4, Programme de Recherche et d'Innovation dans les Transports Terrestres (national) (2008-2009)

Coopérations européennes et internationales

- Co-organisation d'une session « [Scenarios, decisions and public deliberation](#) » à la conférence « Our common future under climate change » (Paris, July, 2015), avec R. Lempert (RAND Corporation, Santa Monica, United States of America), E. Trutnevyte (ETH Zurich, Zurich, Switzerland), K. Fløttum (University of Bergen, Bergen, Norway), P. Dargusch (University of Queensland, Brisbane, Queensland, Australia), J. Vervoort (University of Oxford, Oxford, United Kingdom).
- Participation au développement des « Shared-Socioeconomic Pathways », la nouvelle génération de scénarios pour la recherche sur le climat, participations aux workshops du GIEC à Boulder, USA (2011), The Hague, Netherlands (2012), IIASA, Laxemburg, Austria (2015).
- Organisation avec une chercheuse de l'Energy Institute de l'University College London du Workshop [IQ SCENE : Innovative techniques for Quantitative SCenarios in ENergy and Environmental research](#) (26-27 mars 2014).
- Participante sélectionnée pour le « [Early-career scientists DISCCRS VIII Climate Symposium](#) », Colorado Springs, Colorado, USA (13-18 octobre 2013).
- Visiteur au National Center for Atmospheric Research (Boulder, Colorado, USA) dans le cadre du « Advanced Study Program » (Mars 2012), coopération avec V. Schweizer et B. O'Neill.
- Participation au Integrated Assessment Modeling Consortium (consortium de la communauté des modèles intégrés pour le développement de scénarios pour la recherche sur le climat, coordonné par J. Weyant, Stanford, N. Nakicenovic, International Institute for Applied Systems Analysis, et M. Kainuma, Japan's National Institute for Environmental Studies) (2011-...)
- Participation au réseau Energy Modeling Forum (projet de comparaison de résultats de modèles coordonné par Stanford), Working Group EMF 25 « Energy Efficiency and Climate Change Mitigation » (2008-2011)

Recherche de contrats, réponses à appels à projets,...

- Réponses à appels à projets (nationaux, FP7 et H2020 européen).

5. Affiliations

- French Association of Environmental and Resource Economists (FAERE)
- European Association of Environmental and Resource Economists (EAERE)
- Association Française de Science Economique (AFSE)
- Society for decision making under deep uncertainty

II. Présentation et synthèse des travaux

1. Préambule

Remerciements

Le texte qui suit est à la première personne, mais il oscille entre le singulier et le pluriel : la recherche que je pratique n'est pas un exercice solitaire. Je remercie mes collègues et co-auteurs pour les échanges sympathiques et stimulants de nos réunions autour d'un texte, d'un modèle ou d'un café. Je remercie tout particulièrement ceux qui ont subi mes débuts dans l'expérience d'encadrement : je ne sais pas quel côté a le plus appris, mais j'ai énormément appris ! Je remercie aussi ceux qui m'ont poussé avec constance et bienveillance à l'écriture de ce dossier de demande d'inscription à l'Habilitation à Diriger des Recherches. Sur une note plus personnelle, je remercie Antoine, pour son soutien, et Lila et Titouan qui incarnent avec tendresse et espièglerie la génération future dont il est souvent question dans l'affaire climatique, et qui n'oublent pas de me rappeler ce qui compte vraiment.

Positionnement de mes travaux

Mes travaux s'intéressent à la question du changement climatique, défi majeur posé à nos sociétés, qui porte à une échelle et une complexité sans précédent la question des politiques publiques. Le climat est un bien public global, mais il y existe une grande hétérogénéité des coûts et des bénéfices. De plus, c'est une question qui implique le très long-terme, et de nombreuses irréversibilités et incertitudes. Les causes du changement climatique, ainsi que les solutions face aux défis qu'il pose, impliquent l'ensemble des aspects de nos modes de vie, concernent tous les secteurs économiques, et nécessitent de penser les interactions entre des systèmes complexes socio-économiques, techniques et naturels.

J'aborde cette question du changement climatique à travers l'économie de l'environnement et des ressources (économie du changement climatique, et économie de l'énergie puisque l'énergie représente une grande partie des émissions de gaz à effet de serre), ainsi que des travaux multidisciplinaires en lien avec modélisation du climat et du cycle du carbone, ou mobilisant les mathématiques appliquées, la recherche opérationnelle, ou les sciences de l'environnement. Mes travaux sont publiés pour une partie dans des journaux d'économie, pour une autre dans des revues interdisciplinaires telles que *Climatic Change*, *Global Environmental Change*, *Climate Policy* ou *Nature Communications*. Il me semble en effet que ce lien avec d'autres disciplines est nécessaire pour répondre à des questions à teneur économique *in fine* mais pour lesquelles la compréhension de mécanismes physiques est clé pour poser correctement la question et représenter de façon pertinente les mécanismes, ou pour construire et tirer parti de résultats de modèles reposant sur de nombreuses équations et paramètres car représentant des systèmes complexes.

La plupart de mes travaux sont de nature appliquée, et s'appuient sur des modèles numériques. Les modèles sont pris comme une heuristique, un cadre à penser, pour tenter d'analyser les interactions dans un système complexe, de dégager une vision globale et systémique, et de faire ressortir des résultats quantifiés robustes ou les déterminants principaux des incertitudes, dans une démarche prospective.

Le bilan qui suit présente mes travaux qui se rattachent à deux grandes questions transversales (et à leur intersection) : celle de l'irréversibilité et des inerties, et celle des incertitudes. Ainsi, le bilan n'est pas exhaustif et exclut un certain nombre de travaux, sur des sujets connexes, tels que la précarité énergétique par exemple.

Note 1 : Les graphiques et tableaux issus de mes publications n'ont pas été traduits en français, car je fais l'hypothèse que les lecteurs de ce document lisent l'anglais. Je prie le lecteur de m'excuser pour la rupture de style que cela engendre.

Note 2 : Par souci de compacité de ce document, je ne fournis pas de version intégrale de certains de mes articles, mais les liens vers leurs versions en ligne sont donnés.

2. Introduction : irréversibilités, incertitudes et économie du changement climatique

Il y a plus de 40 ans, Henry (1974) et Arrow and Fisher (1974) mettaient en lumière l'importance de deux éléments pour les décisions de développement économique ayant un impact sur l'environnement: l'irréversibilité et l'incertitude. L'irréversibilité renvoie à une décision qui réduit significativement, pour une longue période, la diversité des choix futurs possibles (définition de Henry, 1974). L'incertitude renvoie au fait qu'au moment de la prise de décision les coûts et les bénéfices futurs liés à cette décision ne sont pas parfaitement connus. Les deux articles montrent que négliger l'irréversibilité introduit un biais en faveur des actions irréversibles, et que prendre en compte son irréversibilité diminue bénéfices de cette action. C'est bien la conjonction des deux¹ qui pose un défi à la décision, et fait émerger une valeur d'option à l'attente² (Pindyck, 1991) et un principe de précaution³ (Gollier et al., 2000). Les deux articles fondateurs illustrent leurs propos en l'appliquant à la préservation d'un espace naturel ou d'un patrimoine culturel, par exemple les choix entre préserver une forêt de séquoia ou la couper pour y développer une activité économique, entre construire ou non un barrage hydroélectrique dans un canyon remarquable, ou encore entre conserver la cathédrale Notre-Dame ou la raser pour construire un parking. Arrow et Fisher concluent leur texte par *“the same reasoning would apply to cumulative “macro” environmental effects, such as the increasing concentration of carbon dioxide in the global atmosphere, with its attendant climatic changes, as predicted by some ecologists”*. Le changement climatique porte en effet à une échelle sans précédent la conjonction des deux éléments, irréversibilité et incertitude, et pose à nos sociétés un défi sans précédent de décision sous incertitude⁴.

Depuis 1974, de nombreux prolongements théoriques, et applications de ce cadre irréversibilité-incertitude au cas du changement climatique, ont été développés⁵. Ils conduisent notamment à placer la décision dans un cadre de décision séquentielle, dans lesquelles les décisions sont révisées avec l'arrivée d'informations nouvelles. Dans le cas du climat, l'irréversibilité se retrouve des « deux côtés » de la décision d'atténuation (i.e. de réduction des émissions). En effet, en repoussant un investissement (d'atténuation) irréversible, on garde ouverte l'option de ne pas investir si l'incertitude quant à la profitabilité du projet se résout sur un cas non-favorable, par exemple si la sensibilité climatique n'est pas très élevée. De l'autre côté, parce que l'accumulation de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère est irréversible, et/ou si le changement climatique conduit à des dommages irréversibles, le fait de ne pas avoir investi assez dans l'atténuation conduit aussi à une réduction des options. Par exemple, tout délai à l'atténuation ferme la porte à des cibles de température ambitieuses (Stocker, 2013). Le signe de la valeur d'option agrégée dépend in fine des poids relatifs de l'ensemble des effets d'irréversibilité en jeu. Il ne semble pas qu'il y ait à ce jour de consensus clair sur le signe de cette valeur d'option, par exemple Ha-Duong (1998) conclue en faveur d'une action d'atténuation précoce ambitieuse, mais Manne et Richels (1995) et Caron et Odhorf (2010) concluent l'inverse. Parson et Karwat (2011) synthétisent les études existantes et montrent que leurs conclusions en faveur d'une action d'atténuation sur le court-terme ambitieuse ou au contraire plus modérée dépend des

¹ Sans incertitude, on peut prendre les “bonnes” décisions aujourd'hui et le fait qu'elles soient irréversibles n'est pas problématique. Sans irréversibilité, on peut réadapter ses choix à tout instant aux informations que l'on a.

² Si l'information est croissante, c'est-à-dire si l'incertitude est réduite dans le futur, attendre avant de prendre une décision irréversible a une valeur (d'option) : avec une meilleure information, une meilleure décision pourra être prise.

³ Le Principe de Précaution est le principe selon lequel « l'absence de certitude, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment, ne doit pas retarder l'adoption de mesures effectives et proportionnées visant à prévenir un risque de dommages graves et irréversibles à un coût économique acceptable » (article 1 de la loi Barnier du 2 février 1995).

⁴ S'il fallait le préciser, l'incertitude ne porte pas sur la réalité du changement climatique, ou sur son origine anthropique, mais sur l'amplitude ou sur certains mécanismes du système-Terre et sur la compréhension précise des impacts du changement climatique ou encore la connaissance des technologies d'atténuation et des possibilités d'adaptation.

⁵ Voir par exemple Freixas et Laffont 1984, Hanemann 1989, Kolstad 1996, Ulph et Ulph 1997, Gollier et al., 2000, Fisher 2000, Gollier et Treich, 2003, Mensink et Requate, 2005, Traeger, 2014.

hypothèses faites sur les distributions de probabilité des éléments incertains et sur les convexités des fonctions de coûts de l'atténuation et de coûts des dommages.

Mes travaux sont différents de et complémentaires à la littérature qui étend et applique le cadre irréversibilité-incertitude au changement climatique. Je ne travaille pas avec un cadre de modélisation unique intégrant abattement des émissions et dommages du changement climatique, et arrivée d'information (sur la sensibilité climatique⁶ en particulier). Néanmoins, les deux éléments, irréversibilités et incertitudes, sont centraux dans mes questionnements et je vais les utiliser comme cadre d'organisation du bilan de mes travaux de recherche :

(i) la première partie (Section 3) s'attache à « ouvrir la boîte » des irréversibilités et inerties à l'œuvre pour la question de l'atténuation du changement climatique, irréversibilité et inerties qui sont typiquement modélisées de façon très simplifiée dans la littérature citée ci-dessus. Les travaux présentés s'attachent à quantifier les liens entre (ir)réversibilité de l'accumulation des émissions et inerties dans l'atténuation, et à en tirer quelques implications pour les politiques climatiques. L'exploration quantitative de ces liens apparaît d'autant plus nécessaire qu'il n'y a pas de consensus sur le signe de l'effet agrégé des irréversibilités dans la question climat.

(ii) la seconde partie (section 4) propose quant à elle « d'ouvrir la boîte » des incertitudes, en considérant de nombreux éléments incertains, et non pas seulement la sensibilité du climat comme c'est souvent le cas dans la littérature ci-dessus. Cette extension des éléments incertains considérés apparaît d'autant plus pertinente que l'implication de la sensibilité climatique pour la valeur sociale du carbone est surestimée dans les études existantes (Marten, 2011)⁷.

Incertitude et irréversibilité sont donc pris comme axes de présentation du déroulé du bilan de mes travaux, même si, comme le montrent les dates des articles, ces deux axes ne résultent pas d'un cheminement scientifique linéaire, mais plus d'une construction ex-post du cheminement présenté ici. Chronologiquement, mes travaux ont plutôt donné des touches successives dans le vaste champ de l'économie du changement climatique, en y abordant des questions connexes, et inter-reliées, et ont pour objectif de contribuer à répondre aux vastes questions (que j'ai commencé à explorer pendant ma thèse) posées par la prospective des émissions de GES, la compréhension des liens entre activités économiques et émissions et des déterminants de ces liens, et l'évaluation ex-ante de politiques/d'objectifs de réduction des émissions selon les critères d'efficacité, de coût, de coût-efficacité, d'efficience ou de co-bénéfices⁸.

La suite de cette introduction donne quelques éléments sur les incertitudes et irréversibilités dans le système couplé humains-climat (Section 2.1), sur les scénarios pour la recherche sur le changement climatique (Section 2.2) et sur les modèles mobilisés dans mes travaux dans le paysage des modèles en économie du changement climatique (Section 2.3). Ces éléments permettent de replacer les travaux présentés ensuite dans le contexte dans lequel ils s'inscrivent.

⁶ On pourrait d'ailleurs remettre en cause cette hypothèse d'arrivée d'information sur la sensibilité climatique à la lumière du fait que malgré des avancées significatives dans la science du climat et une confiance accrue dans la précision de l'intervalle lui-même, l'intervalle « probable » de la valeur de la sensibilité climatique (1,5-4,5°C) ne s'est pas réduite depuis le premier rapport du GIEC ; et d'arguments quant à la possibilité d'apprentissage « négatif » (Oppenheimer et al., 2008) ou « déconcertant » (Hannart et al., 2013), c'est-à-dire des cas où un progrès des connaissances conduit à une divergence par rapport à la « vraie » valeur de la sensibilité climatique, ou à un accroissement de l'incertitude sur sa valeur (en particulier du fait de l'existence de rétroactions positives).

⁷ Les représentations simplifiées du système climatique dans les modèles utilisés pour évaluer la valeur sociale du carbone ne prennent pas en compte qu'une sensibilité climatique élevée est associée à une dynamique d'atteinte de la température d'équilibre plus lente. Ces modèles tendent donc à surestimer le réchauffement de court-terme dans le cas d'une sensibilité climatique élevée, et donc la valeur sociale du carbone.

⁸ Une politique est efficace si elle permet d'atteindre l'objectif fixé, elle est coût-efficace si elle permet de l'atteindre au moindre coût, elle est efficiente si en plus l'objectif atteint est optimal. La notion de coût sera discutée dans le deuxième exemple de la Section 4.2, et celle de co-bénéfices dans la Section 3.3.

2.1. Incertitudes et irréversibilités

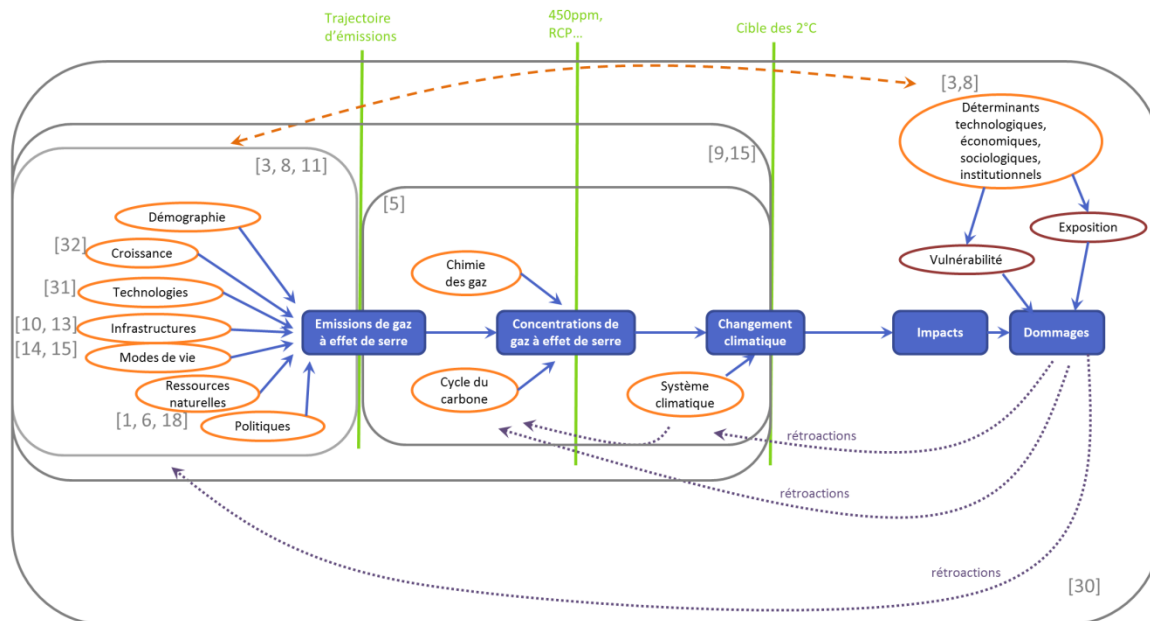


Figure 1 : Chaîne causale des émissions de GES jusqu'aux dommages du changement climatique, et rétroactions. Les numéros correspondent aux travaux tels que numérotés dans mon Curriculum Vitae détaillé en Partie I de ce dossier. Ils situent les éléments de la chaîne dont traitent les articles en question.

La Figure 1 ci-dessus présente la chaîne causale des émissions de GES jusqu'aux dommages du changement climatique, ainsi que les rétroactions entre les éléments de ce système couplé humains-Terre.

Sans oublier le consensus scientifique sur cette chaîne causale, il faut noter qu'à chaque maillon de la chaîne il existe des incertitudes, par exemple sur le lien entre croissance et émissions, sur certains mécanismes du cycle du carbone, sur le changement climatique global et les changements régionaux résultant d'une concentration de GES donnée, sur les impacts pour un niveau de réchauffement donné, sur les dommages pour l'économie correspondant à ces impacts, et sur les rétroactions, par exemple du changement climatique sur le cycle du carbone.

Du fait de ces incertitudes, analyses et politiques se concentrent sur des cibles d'atténuation, plus ou moins loin dans la « cascade des incertitudes » (en température, en concentration ou en émissions), qui représentent une assurance face aux incertitudes, en particulier face au risque de dommages climatiques catastrophiques (Weitzman 2012). Mes travaux présentés les sections 3 et 4 de ce bilan portent ainsi sur des trajectoires d'émission (Rozenberg et al., 2010, Waisman et al., 2012, 2013, Rozenberg et al., 2014, Guivarch et al., 2015, Guivarch et Monjon, 2016), des trajectoires de concentration (Gasser et al., 2015) ou des objectifs en température (Guivarch et Hallegatte, 2011, 2013), notamment l'icône politique des 2°C.

A chaque maillon de la chaîne, il y a également des irréversibilités, au premier rang desquelles l'irréversibilité de l'accumulation du stock de GES dans l'atmosphère. En « aval » du stock de GES, des points de basculement ('tipping-points') existent dans le système climatique ou dans les dommages associés aux changements climatiques (Kopp et al., 2016). Le franchissement de certains de ces points est irréversible, ou tout du moins il est long ou coûteux de revenir à la situation initiale. En « amont » du stock de GES, les inerties dans l'évolution des politiques et institutions, des stocks de capital productif, d'équipements des ménages et d'infrastructures, des choix de localisation de ce capital et ces infrastructures, des stocks de connaissances et de compétences, des habitudes de consommation, mais aussi les non-linéarités et phénomènes de « dépendance au chemin » (David, 1985 ; Page, 2006), font que les décisions, en particulier d'investissement, aujourd'hui contraignent sur le long-terme les émissions de GES, ou les potentiels et les coûts d'abattement des émissions.

2.2. Scénarios

Les scénarios pour la recherche sur le changement climatique visent à explorer les évolutions futures possibles du système humains-Terre. L'encadré ci-dessous, adapté de Guivarch et Rozenberg (2013), donne un bref aperçu de ces scénarios. Plus d'éléments sont disponibles dans le support d'une intervention que j'ai faite sur les scénarios du GIEC dans les masters MPAPDD-MSPPE : http://www2.centre-cired.fr/IMG/pdf/prospective_giec.pdf.

Encadré 1 - Les scénarios pour la recherche sur le climat

Les SRES

Le rapport du GIEC sur les émissions (Special Report on Emissions Scenarios, SRES, Nakicenovic, 2000) examinait les effets sur les émissions de GES des incertitudes sur un large éventail de «forces motrices» (démographie, croissance économique, changement technologique...). Les scénarios SRES sont regroupés en quatre grandes familles (A1, B1, A2, B2), résultant de la combinaison de deux jeux d'hypothèses divergentes sur les évolutions socio-économiques futures : d'une part une importance prédominante accordée aux valeurs économiques ou, au contraire, une importance croissante des valeurs environnementales, de l'autre une mondialisation croissante versus une régionalisation croissante (Figure 1). Pour chaque famille, un scénario « marqueur » quantifié a été choisi. Ces scénarios d'émissions ont alimenté une chaîne de modèles pour aboutir à des projections d'évolution climatique globales ou régionales. Puis, les scénarios climatiques ont été réinjectés dans des modèles d'impacts permettant de simuler les effets du climat sur les écosystèmes ou les vecteurs de maladies par exemple. Le lecteur intéressé pourra trouver une analyse détaillée de ces travaux dans Dahan-Dalmedico (2007).

Une nouvelle génération de scénarios

Bien que l'exercice de scénarisation SRES ait été très fructueux, une nouvelle génération de scénarios (Moss et al., 2010) a été jugé nécessaire, pour trois raisons principales :

1. Les scénarios doivent être mis à jour pour prendre en compte un contexte socio-économique qui a beaucoup évolué. Par exemple, la possibilité d'un développement aussi rapide que la trajectoire suivie par les pays émergents depuis 2000 n'était pas incluse dans les SRES.
2. Des avancées des modèles physiques de climat conduisent à des besoins d'informations plus détaillées et à des résolutions plus fines que celles fournies par les SRES: émissions d'aérosols, description explicite à une échelle géographique fine des usages des sols...
3. Les scénarios existants ne fournissent pas tous les éléments nécessaires à l'étude des impacts et de l'adaptation, qui demande des scénarios climatiques avec une résolution spatiale et temporelle fine, mais aussi l'explicitation des développements socio-économiques pertinents pour l'analyse de la vulnérabilité aux changements climatiques (par exemple l'évolution des dynamiques d'urbanisation, les évolutions des modes de gouvernance, etc.).

Les "RCP" et les "SSP" constituent les briques de la nouvelle architecture des scénarios.

« RCP » : *Representative Concentration Pathways* (Trajectoires représentatives de concentration)

Les RCP sont des scénarios de l'évolution des concentration de GES, d'aérosol et de gaz chimiquement actifs, dans l'atmosphère sur la période 2006-2100, avec une extrapolation jusqu'à

2300. Au nombre de quatre, ils ont été sélectionnés sur la base de 300 scénarios publiés dans la littérature de façon à couvrir une palette aussi large que possible des trajectoires futures de forçage radiatif envisageables. Chacun de ces quatre scénarios RCP est étiqueté en fonction du forçage radiatif qu'il atteint en 2100 : 2.6 W/m², 4.5 W/m², 6 W/m² et 8.5 W/m² (Figure 3). Le RCP 8.5, le plus pessimiste (pour le changement climatique), n'est dépassé, en termes de forçage radiatif, que par environ 10% des scénarios publiés dans la littérature. Le RCP 2.6, le plus favorable pour le changement climatique, n'a pas d'équivalent dans les SRES et ne dépasse que près de 10% des scénarios publiés dans la littérature à l'époque du choix des RCP⁹.

“SSP”: *Shared Socio-economic Pathways* (Trajectoires socio-économiques communes)

Le point central de la nouvelle architecture des scénarios est l'idée que ces quatre trajectoires de concentration ne sont pas associées à un scénario socio-économique unique, mais peuvent au contraire résulter de différentes combinaisons d'évolutions économiques, technologiques, démographiques et institutionnelles futures. Ce sont ces combinaisons que les « SSP » cherchent à explorer.

Afin d'être pertinents à la fois pour l'étude de l'adaptation, de l'atténuation, et des impacts du changement climatique, cinq scénarios « SSP » ont été construits de façon à couvrir l'espace défini par deux axes : l'un représentant les défis de l'adaptation au changement climatique pour les sociétés, l'autre représentant les défis de l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre (Figure 2). Les défis de l'adaptation sont définis comme la combinaison de trois composants : (1) les dimensions socio-économiques de l'*exposition* aux risques liés au changement climatique ; (2) les éléments affectant la *sensibilité* des systèmes socio-économiques et écologiques au changement climatique ; et (3) les facteurs déterminant les *capacités d'adaptation* de ces systèmes au changement climatique. Les défis de l'atténuation sont quant à eux la combinaison (1) des déterminants des émissions de gaz à effet de serre dans les scénarios de référence et (2) des facteurs susceptibles de déterminer des *capacités d'atténuation* des sociétés.

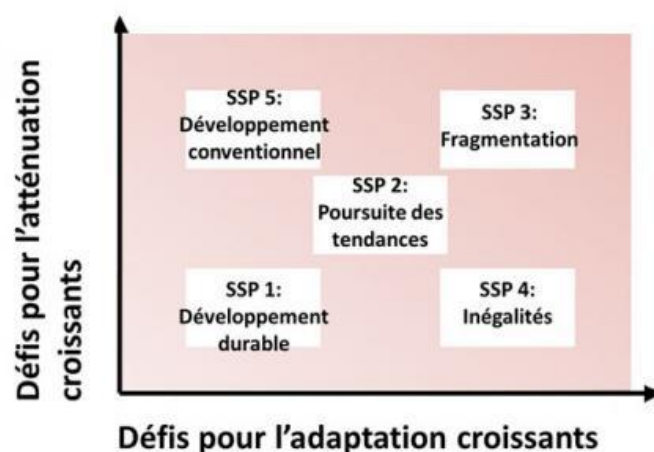


Figure 2 : L'espace d'incertitude des SSP, et les cinq scénarios-types. Source : adapté d'O'Neill et al. (2014).

Chaque SSP est défini par un récit qualitatif des évolutions socio-économiques d'ici la fin du 21^{ème} siècle (O'Neill et al., 2015), ainsi que par des données quantitatives sur les trajectoires des déterminants de ces récits (population, PIB, urbanisation, ...). Le SSP1 décrit un monde marqué par

⁹ Depuis de nombreuses études se sont focalisées sur des scénarios compatibles avec la cible des 2°C, ce qui conduit à leur sur-représentation dans la littérature et la base de données de scénarios du 5^e rapport du GIEC (van Ruijven, 2016).

une forte coopération internationale, donnant la priorité au développement durable. Le SSP2 décrit un monde caractérisé par la poursuite des tendances actuelles. Le SSP3 dépeint un monde fragmenté, affecté par une croissance économique lente et peu soucieuse de l'environnement. Le SSP4 est celui d'un monde marqué par de grandes inégalités entre pays et en leur sein. Une petite élite mondiale y serait responsable de l'essentiel des émissions de GES, ce qui rend les politiques d'atténuation plus facile à mettre en place, dans la logique¹⁰ adoptée dans le récit qualitatif du SSP4 (O'Neill et al., 2015), tandis que la plus grande partie de la population resterait pauvre et vulnérable au changement climatique. Et enfin le SSP5 décrit un monde qui se concentre sur une croissance rapide, fondée sur une forte consommation d'énergie et des technologies émettrices de carbone ; la hausse du niveau de vie permet en revanche d'augmenter la capacité d'adaptation.

Une architecture en matrice

Les scénarios socio-économiques sont ainsi découplés des scénarios climatiques. La vision qui sous-tend ce découplage est celle d'une analyse « matricielle » des impacts, de la vulnérabilité, des coûts de l'adaptation et de l'atténuation du changement climatique (van Vuuren et al., 2014, Figure 3 ci-dessous). Lue horizontalement, la matrice compare les conséquences d'un même changement climatique dans différents scénarios socio-économiques. Lue verticalement, elle compare les coûts de l'atténuation, de l'adaptation et des impacts pour différentes «cibles» de forçage radiatif, pour un monde socio-économique donné. Cette approche a la particularité d'isoler la décision prise du point de vue du climat de toutes les autres décisions (de politiques fiscales, de santé, d'éducation, etc.).

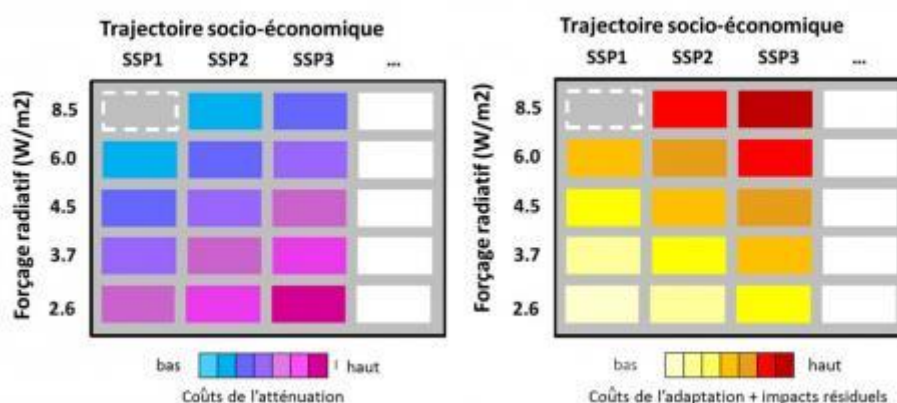


Figure 3 : Evaluation "en matrice" des coûts de différentes politiques d'atténuation, d'adaptation, et des impacts résiduels. Source : adapté de van Vuuren, et al. (2014).

2.3. Modèles

Pour construire et évaluer ces scénarios, et analyser les interactions entre systèmes humains et système-Terre une diversité de modèles existe. Ils varient quant aux frontières du système représenté, et au niveau de finesse dans la représentation des mécanismes à l'œuvre dans chacun des sous-systèmes.

¹⁰ On pourrait, à l'inverse, imaginer que le fait qu'une petite élite mondiale soit responsable de l'essentiel des émissions et le reste du monde vulnérable au changement climatique rend la mise en place de politiques d'atténuation plus difficile politiquement, du fait du pouvoir politique de cette élite.

Les modèles dit « d'évaluation intégrée » (Integrated Assessment Models, IAM) rassemblent la représentation d'un ou plusieurs domaines dans un cadre commun (définition très large des IAM donnée par Nordhaus, 2013, p.1070). Aujourd'hui, il existe deux grandes classes de modèles IAM dans le domaine énergie-climat. D'une part, les modèles dit « process-based integrated assessment models » (Sathaye et Shukla 2013), ou parfois appelés modèles E3 pour économie-énergie-environnement, représentent les déterminants et mécanismes en jeu dans l'évolution des systèmes énergétiques et économiques. Ils sont utilisés pour construire des scénarios d'émissions et pour analyser les questions d'atténuation. En général, ils ne représentent pas les dommages dus au changement climatique ; et se placent alors dans un cadre coût-efficacité. Au sein de cette classe, il existe une diversité d'architectures de modélisation : optimisation des systèmes techniques, équilibre général calculable, dynamique des systèmes (voir Krey, 2014, pour une revue récente). D'autre part, les modèles IAM d'analyse coût-bénéfice qui représentent impacts et atténuation du changement climatique dans un même cadre. Dans ces modèles les représentations des déterminants et mécanismes ne sont pas détaillés et explicites, mais passent par des fonctions d'abattement et des fonctions de dommages. Le représentant canonique de cette classe de modèles est le modèle DICE (Nordhaus, 2014).

Une grande partie des travaux présentés dans ce bilan (Rozenberg et al., 2010, Waisman et al., 2012, 2013, Rozenberg et al., 2014, Guivarch et al., 2015, Guivarch et al., 2016, Guivarch et Monjon, 2016) utilisent le modèle « process-based IAM » Imacim-R, que je contribue à développer avec une équipe au Cired. L'encadré 2 ci-dessous décrit brièvement ce modèle.

D'autres modèles sont également utilisés dans certains des travaux présentés :

- Dans (Giraudet et al., 2011, 2012, Branger et al., 2015) le modèle Res-IRF du secteur résidentiel en France, développé par Louis-Gaëtan Giraudet ;
- Dans (Guivarch et Hallegatte, 2011, 2013) un modèle simple du cycle du carbone et climat à 2 et 3 boîtes ;
- Dans (Gasser et al., 2015) des modèles de complexité intermédiaire ou du système-Terre, que je ne contribue pas à développer mais que mes co-auteurs développent et utilisent.

Plus récemment, j'ai contribué à développer un modèle IAM d'analyse coût-bénéfice, en approximation dynamique, pour en particulier étudier des dommages portant sur la croissance ou induisant des chocs (Guivarch et Pottier, 2015). Un axe de mes perspectives de recherche s'appuie sur l'extension et l'analyse de ce modèle (voir Partie III).

Encadré 2 – Le modèle Imacim-R monde

Le modèle Imacim-R (Waisman et al., 2012) est un modèle multi-sectoriel et multi-régional de l'économie mondiale qui représente les évolutions conjointes des systèmes techniques, des comportements de consommation d'énergie et de la croissance économique.

Il combine un cadre d'équilibre général calculable avec des modules sectoriels, représentant de façon explicite les choix technologiques, dans une architecture hybride et récursive. Il décrit les trajectoires de croissance dans un monde de second-rang avec imperfections des marchés, utilisation incomplète des facteurs de production et anticipations imparfaites.

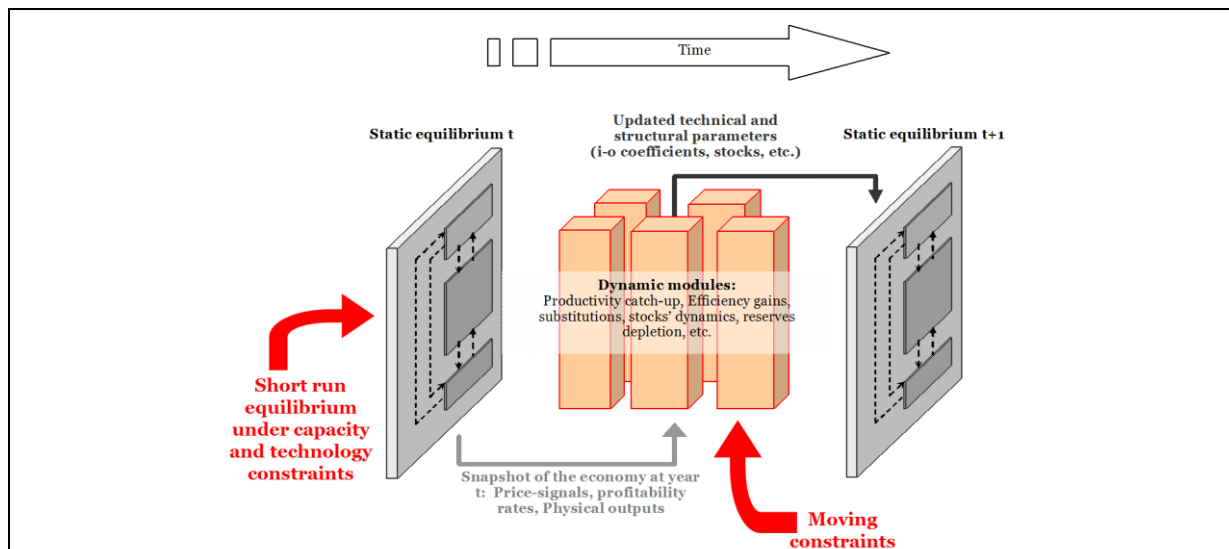


Figure 4: The recursive and modular structure of the IMACLIM-R model. (Waisman et al., 2012)

Le modèle représente de façon endogène le changement structurel, les marchés de l'énergie et le changement technique induit (par les prix). Les émissions de GES représentées se réduisent au CO₂ dû à la combustion. Les principales hypothèses exogènes portent sur la démographie, la croissance de la productivité du travail, les potentiels maximum des technologies (renouvelables, capture et séquestration du carbone, véhicules électriques...), les taux d'apprentissage faisant décroître les coûts de ces technologies, les ressources fossiles, les paramètres des fonctions représentant l'efficacité énergétique, les paramètres des fonctions représentant les modes de vie et comportements de demande d'énergie (taux de motorisation, taille des logements, évolution des préférences de consommation...).

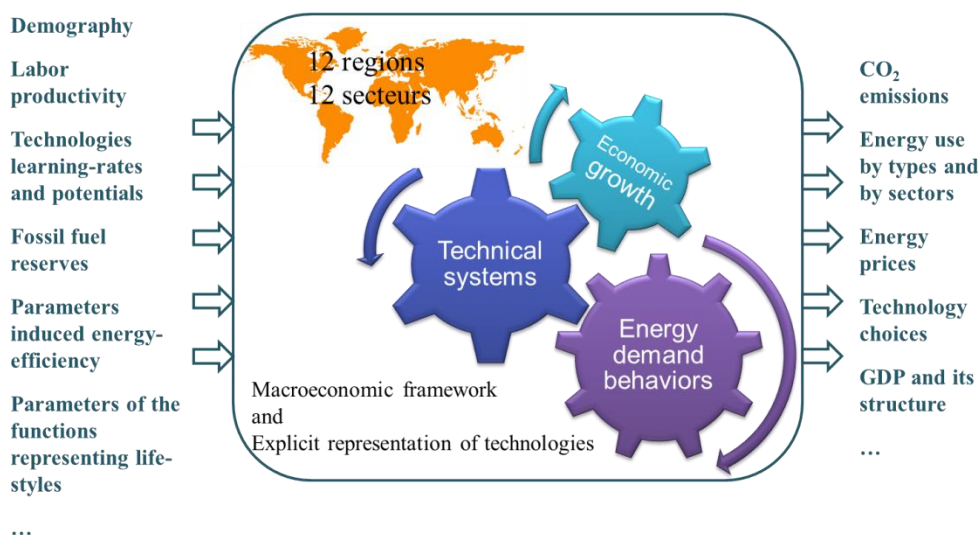


Figure 5: Inputs and outputs of Imacim-R world model.

Le PIB est un résultat du modèle, mais il est tiré par des trajectoires démographiques exogènes (population totale et population active) et des croissances exogènes de la productivité du travail. Le changement structurel (évolution des parts des secteurs dans le PIB) et le changement technique (substitutions et efficacité des facteurs de production) sont également endogènes, et induits par les changements de prix relatifs. Le changement technique est influencé par les hypothèses sur les coûts et potentiels des technologies.

Une description détaillée du modèle est disponible à <https://wiki.ucl.ac.uk/display/ADVIAM/IMACLIM>.

Dans le paysage des modèles d'évaluation intégrée (Integrated Assessment Models, IAMs), Imaclim-R fait partie des modèles dits « process-based IAM », et peut se classer dans la catégorie des modèles d'équilibre général, récurrents dynamiques, avec une diversité moyenne des technologies représentées. Les tests standards de réponse à des prix du carbone le qualifient de modèle à « faible réponse », c'est-à-dire qu'une trajectoire de prix du carbone donnée conduit à des réductions d'émissions relativement faibles et des coûts de l'atténuation relativement élevés en comparaison des autres IAMs (Kriegler et al., 2015). Cette caractéristique s'explique en particulier par la représentation « putty-clay » (Johansen, 1959) du capital et les mécanismes de second-rang pris en compte dans l'architecture de modélisation.

Les travaux présentés dans la partie « bilan » de ce dossier qui mobilisent le modèle Imaclim-R monde prennent le cadre de modélisation comme « donné » et s'intéressent à la façon de l'utiliser pour prendre en compte les incertitudes, ou s'attachent à analyser les résultats de scénarios ou d'ensemble de scénarios produits avec le modèle. Certains de mes travaux de thèse (par exemple Guivarch et al., 2009), ainsi que certains travaux de mes collègues (par exemple Kriegler et al., 2015), proposent une évaluation de ce cadre de modélisation. D'autres travaux d'évaluation sont en cours, notamment dans le cadre du projet européen ADVANCE (<http://www.fp7-advance.eu/>). Par ailleurs, un certain nombre d'améliorations et d'évolutions du modèle sont envisagées dans les perspectives de recherche de l'équipe de modélisation Imaclim-R, dont certaines sont détaillées dans la Partie III de ce dossier.

3. Irréversibilités et inerties, implications pour les politiques d'atténuation

La nature même du problème climatique, une pollution de stock, fait de l'irréversibilité un enjeu central pour les décisions d'atténuation : sauf à mobiliser des technologies « à émissions négatives » (comme nous le discuterons dans la section suivante), une tonne de GES émise aujourd'hui a un impact irréversible sur la constitution de l'atmosphère. Mais le stock de GES s'accumulant dans l'atmosphère n'est pas le seul élément d'irréversibilité dans le système couplé activités humaines-climat. En « aval » du stock de GES, des points de basculement ('tipping-points') existent dans le système climatique ou dans les dommages associés aux changements climatiques (Kopp et al., 2016). Le franchissement de certains de ces points est irréversible, ou tout du moins il est long ou coûteux de revenir à la situation initiale. En « amont » du stock de GES, les inerties dans l'évolution des politiques et institutions, des stocks de capital productif, d'équipements des ménages et d'infrastructures, des choix de localisation de ce capital et ces infrastructures, des stocks de connaissances et de compétences, des habitudes de consommation, mais aussi les non-linéarités et phénomènes de « dépendance au chemin » (David, 1985 ; Page, 2006), font que les décisions, en particulier d'investissement, aujourd'hui contraignent sur le long-terme les émissions de GES, ou les potentiels et les coûts d'abattement des émissions.

Mes travaux jusqu'ici se sont principalement concentrés sur la partie « amont » des irréversibilités et inerties, celles dans les systèmes économiques et socio-techniques. Ici les inerties ne sont pas des constantes de temps « physiques », elles sont conditionnées par les mesures politiques, les institutions, les choix. Il n'y a pas de limite « physique » à la vitesse de réduction des émissions de GES, mais un coût de réduction qui dépend de la vitesse. De même, les irréversibilités ne sont pas absolues. Par exemple, les émissions négatives (résultant par exemple de biomasse-énergie couplée à de la capture et séquestration du carbone, ou de capture directe dans l'atmosphère et séquestration) représentent une possibilité (incertaine) pour inverser l'accumulation des GES. De même, l'abandon prématuré de capital « polluant » (i.e. dont l'utilisation conduit à des émissions de GES), ou sa rénovation énergétique (« *retrofit* »), limitent les irréversibilités introduite par les choix d'investissement, mais représentent un coût.

Ce qui suit présente ces travaux, qui donnent quelques « coups de projecteur » sur les questions d'inertie et d'irréversibilité dans les trajectoires d'émission et leurs implications pour les politiques d'atténuation du changement climatique.

La première section présente deux articles (Guivarch et Hallegatte, 2013 ; Gasser et al., 2015) qui prennent comme point d'analyse la cible politique des « 2°C » (de limiter l'augmentation de la température moyenne globale à 2°C au-dessus du niveau pré-industriel). Cette cible, ou celle des 1.5°C maintenant présente dans l'Accord de Paris, peut être interprétée comme une réponse à la présence d'irréversibilité, de 'tipping-points' dans le système climatique (Jaeger et Jaeger, 2011), même si ce n'est pas la seule interprétation de cet objectif, résultant d'une histoire chaotique de construction science-politique. En effet, ce seuil des 2°C peut constituer une interprétation de l'article 2 de la Convention Climat qui définit l'objectif d'empêcher « toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique ». Dans ces deux articles, nous montrons que l'(ir)réversibilité du stock de GES dans l'atmosphère crée un lien entre vitesse de réduction des émissions et « besoin » en émissions négatives pour atteindre l'objectif des 2°C. Nous quantifions de ce lien, ainsi que les incertitudes associées.

Les articles présentés dans la seconde section s'intéressent au fait que la vitesse de réduction des émissions est elle-même contrainte par la présence d'irréversibilités induites par les choix d'investissement dans le capital à longue durée de vie. Guivarch et Hallegatte (2011) quantifie le legs en termes d'émissions des infrastructures existantes, en s'appuyant sur l'exemple des infrastructures de transport. Puis, je propose deux zooms sur deux questions découlant de l'importance de ce legs : (i) celle du rôle des décisions d'investissement dans les infrastructures dans les politiques d'atténuation ; et (ii) celle du rôle de la rénovation énergétique du capital existant et des politiques pour inciter cette rénovation. Ces questions sont explorées à travers deux exemples de secteurs aux infrastructures à longue durée de vie : la première question avec l'exemple des infrastructures de transport (Waisman et

al., 2012 et 2013), et la seconde par celui de la rénovation thermique des bâtiments résidentiels (Giraudet et al., 2011 et 2012).

Dans la troisième section, j'aborde le fait qu'inerties et irréversibilités mettent la dimension temporelle au cœur de la question climatique et font de l'articulation dynamique entre court-terme et long-terme des politiques climatiques et de leurs effets une question cruciale. Je propose un éclairage partiel de cette question par l'angle spécifique des « co-bénéfices » des politiques d'atténuation (Cassen et al., 2015), et en particulier par l'exemple de la sécurité énergétique (Guivarch et al., 2015).

3.1. Investigation stylisée de la question de l'inertie à l'atténuation

Deux de mes travaux (Guivarch et Hallegatte, 2013 ; Gasser et al., 2015) explorent les implications des inerties à l'atténuation pour l'atteinte de la cible des 2°C. Le premier pose la question des incertitudes conditionnant la faisabilité de l'objectif des 2°C, tandis que le second se focalise sur la question des « émissions négatives ». Dans les deux cas, il s'agit d'une investigation « stylisée » de la question de l'inertie à l'atténuation, où cette inertie est représentée par des fonctions « enveloppes » exponentielles ou linéaires (Figure 6) : l'inertie à la mise en place de politiques et d'actions d'atténuation à court-terme est représenté par la date du pic des émissions, les limites techniques, économiques, sociales et politiques à la vitesse d'atténuation à plus long-terme sont représentées par un taux de décroissance des émissions après le pic ou une décroissance linéaire après le pic. Ces deux formes de courbes sont bien évidemment une représentation simplifiée des possibilités d'atténuation ; une forme exponentielle représente une efficacité marginale de l'atténuation décroissante dans le temps et ne laisse pas la possibilité d'émissions négatives, tandis qu'une forme linéaire représente une réduction d'émission en absolu constante dans le temps et laisse la possibilité d'atteindre des niveaux d'émissions négatifs.

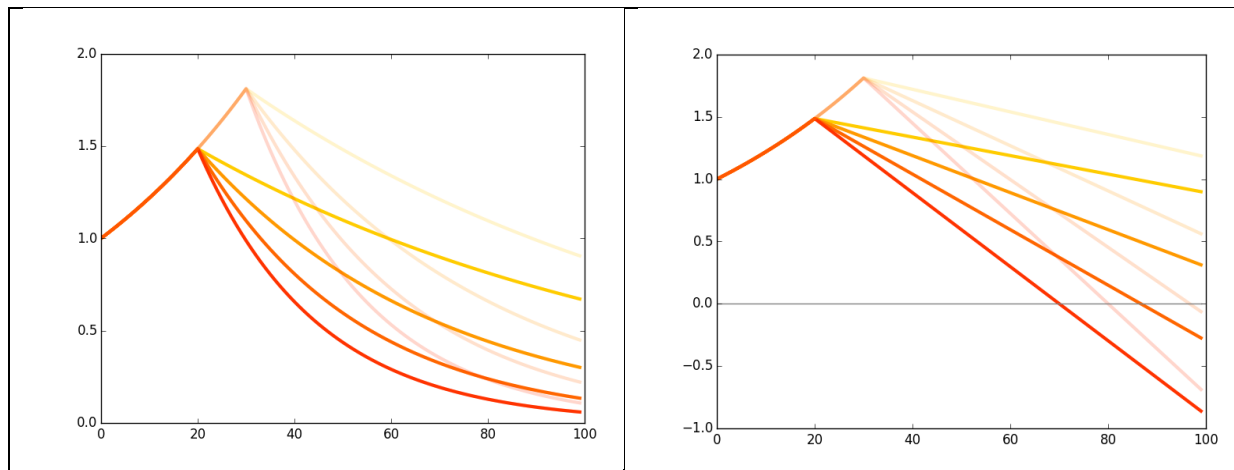


Figure 6 : Fonctions « enveloppes », exponentielles (panneau de gauche) ou linéaires (panneau de droite) représentant l'inertie à l'atténuation. En abscisses les années, en ordonnées les émissions en indice par rapport au niveau d'émission actuel.

Dans Guivarch et Hallegatte (2013), nous faisons ressortir et quantifions, en inversant un modèle simple de cycle du carbone et de climat, le lien entre les deux éléments représentant l'inertie sur le court-terme (date du pic des émissions) et sur le plus long-terme (réduction des émissions après le pic) : si l'on veut respecter une cible de température, la vitesse de décroissance des émissions nécessaire après le pic augmente rapidement avec la date du pic (Figure 7, issue de Guivarch et Hallegatte, 2013). Par exemple, pour rester sous la cible des 2°C, si la sensibilité du climat est de 3°C, un pic des émissions mondiales en 2020 requiert une décroissance des émissions de l'ordre de 5%/an sur le reste du siècle, tandis qu'un pic en 2030 fait monter ce taux à plus de 7%/an. Si l'objectif des 2°C, qui plus est celui des 1.5°C, peut être justifié du point de vue des impacts (Tschakert, 2015), ces

taux extrêmement élevés peuvent faire douter de leur faisabilité (Ranger et al., 2012, Geden et Beck 2014, Geden, 2015), tout du moins si l'on ne parie pas sur la possibilité d'émissions nettes négatives dans la seconde moitié du 21^{ème} siècle (Azar et al., 2010, Peters et al., 2013, Edmonds et al., 2013, van Vuuren 2013). Nous montrons également comment la relation entre date du pic et réduction d'émissions après le pic est modifiée par l'introduction de la possibilité d'émissions nettes négatives (Figure 7, B).

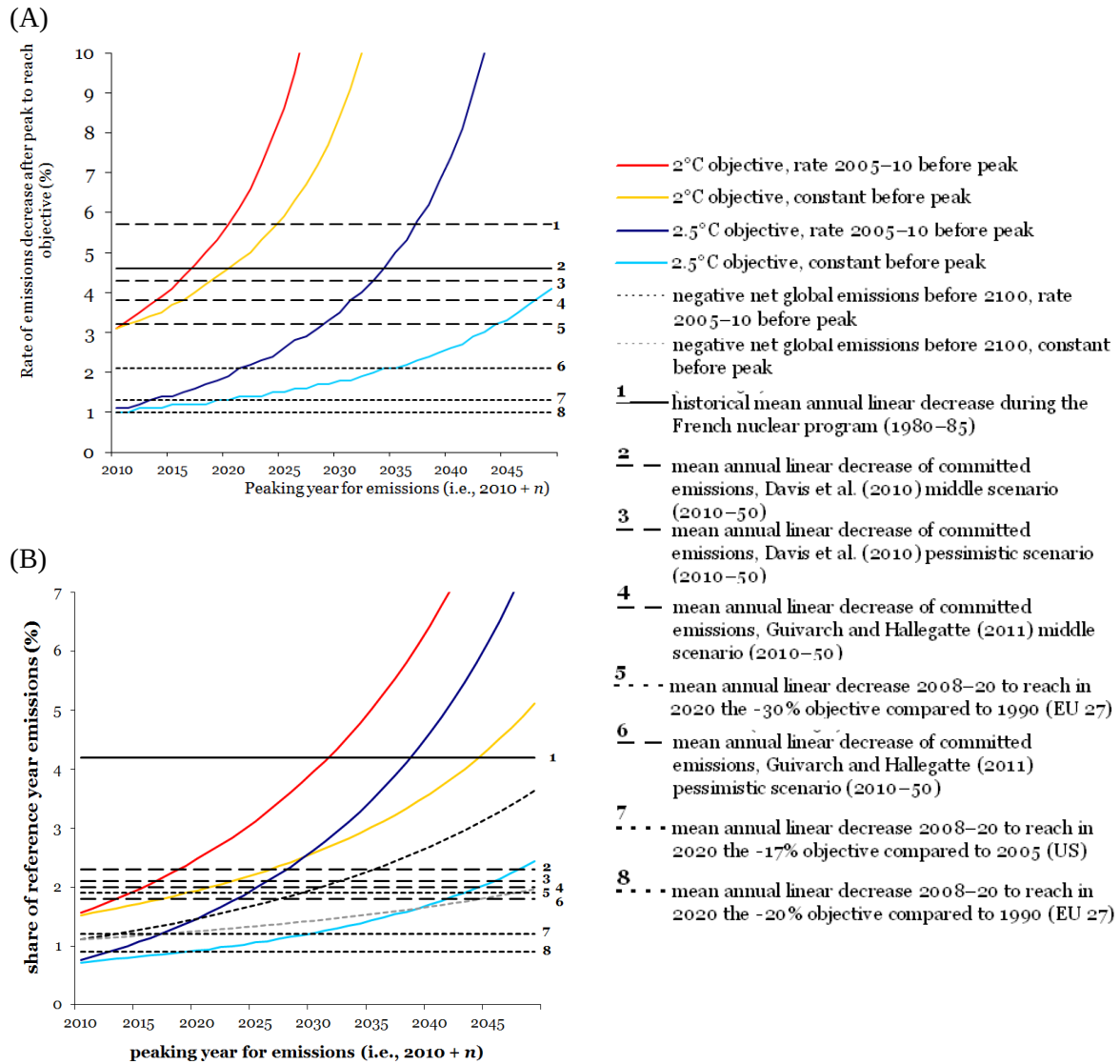


Figure 7: Panel (A) Rate of Emissions Reduction Necessary to Achieve the 2°C Target or a 2.5°C Target as a Function of the Peaking Year for Emissions, for climate sensitivity equal to 3°C. Only CO₂ emissions, including emissions from land-use, land-use change and forestry, are considered; the trajectory of radiative forcing from other gases is forced in this simple modelling experiment. Historical emissions data are from CITEPA, WRI-CAIT and UNFCCC. **Panel (B) Linear Annual Decrease of Emissions, as a Share of 2010 Emissions, Necessary to Achieve the 2°C Target or a 2.5°C Target as a Function of the Peaking Year for Emissions, for a climate sensitivity equal to 3°C.** (Guivarch et Hallegatte, 2013)

Dans la mesure où la question des émissions négatives est centrale dans la possibilité d'atteindre l'objectif des 2°C (Edmonds et al., 2013 ; Sanderson et al., 2016), il est important de pouvoir quantifier le besoin en émissions négatives, ainsi que les incertitudes associées. Dans l'article Gasser et al. (2015), nous quantifions ce besoin en émissions négatives en fonction de la vitesse de l'atténuation conventionnelle, pour suivre le scénario RCP 2.6 (van Vuuren et al., 2011). Nous définissons ici l'atténuation conventionnelle comme la réduction de la production de CO₂ par

combustion d'énergie fossile ou procédé industriel, et les « émissions négatives » comme la capture de CO₂, sur le site de production, via la capture directe dans l'atmosphère ou l'augmentation artificielle des puits naturels. Le RCP 2.6 est celui des quatre trajectoires représentatives de concentration (RCP) qui a une probabilité supérieure à 66% de respecter l'objectif des 2°C. Notre méthodologie procède en trois étapes. D'abord, les émissions de CO₂ compatibles avec le RCP 2.6 sont estimées à l'aide de modèles du système Terre (modèles du cycle du carbone et du climat complexes, et de complexité intermédiaire¹¹). Ensuite, nous construisons des trajectoires d'atténuation conventionnelle, à l'aide de fonctions « enveloppes » stylisées, comme dans l'article précédent (Figure 6). Puis nous déduisons les émissions négatives brutes¹² nécessaires pour être cohérent avec les trajectoires d'atténuation conventionnelle et les émissions de CO₂ compatibles.

Nous montrons que des émissions négatives seront nécessaires même si l'on atteint des taux élevés d'atténuation, mais aussi que les émissions négatives seules ne pourront pas permettre de respecter l'objectif des 2°C. En cela, nous rejoignons les conclusions de Fuss et al. (2014) sur le pari risqué que représentent les émissions négatives. La Figure 8 donne les flux maximum d'émissions négatives nécessaire sur au moins une décennie, ainsi que les besoins de stockage sur le 21^{ème} siècle et étendus jusqu'en 2300.

Les flux maximum d'émissions négatives varient de façon non-linéaire avec l'effort d'atténuation conventionnelle, et peuvent atteindre le même ordre de grandeur que les émissions de CO₂ mondiales actuelles (en négatif). Ainsi tout effort d'atténuation conventionnelle sera plus que compensé (en termes de dioxyde de carbone, et non en termes économiques) par la réduction des besoins en émissions négatives. La période à laquelle ce flux maximum est nécessaire varie également : plus il y a de délai à l'atténuation conventionnelle, plus le flux maximum est nécessaire tôt et soulève donc des questions de maturité et de coûts des possibilités techniques pour réaliser ces émissions négatives.

Les besoins de stockages estimés varient de 25 à 250 GtC d'ici la fin du 21^{ème} siècle, et sont approximativement doublés d'ici 2300. Ces besoins sont également une fonction non-linéaire des taux d'atténuation et de la date du pic des émissions mondiales. Ainsi, tout délai à l'atténuation augmente d'autant plus la quantité totale de CO₂ qui devra être stocké. Si ces estimations de besoin de stockage restent inférieures aux capacités de stockage estimées (Benson et al., 2012), il faut noter que les capacités estimées ne le sont que sur une base techniques et ne prennent pas en compte de limitations en termes de coûts ou d'acceptabilité. Par ailleurs, les différentes technologies permettant de réaliser des émissions négatives (biomasse énergie avec CCS, capture directe, afforestation et reforestation, fertilisation des océans, augmentation du stockage de carbone dans les sols) ont des implications importantes en termes d'usage des terres, d'usage de l'eau, d'albédo ou de consommation en nutriments ou en énergie qui font peser des limites ou arbitrages pour leur développement de grande échelle (Smith et al., 2016).

Un des apports de l'analyse, par rapport aux études sur les émissions négatives conduites avec des modèles d'évaluation intégrée couplés à des modèles de climat simplifiés (par exemple Azar et al., 2010, Edmonds et al., 2013), réside dans la quantification systématique des incertitudes associées à la réponse du système climat-carbone, permise par l'utilisation de modèles du système Terre. L'incertitude sur les résultats provenant de l'incertitude associée à la réponse du système climat-carbone peut être plus grande que la différence entre résultats correspondant à deux hypothèses de trajectoires d'atténuation conventionnelle différentes. Cela montre que l'incertitude sur les émissions négatives liée à notre manque de compréhension du comportement futur du système Terre reste significative pour les décisions de politiques d'atténuation.

¹¹ Ces derniers permettent une exploration plus complète de l'incertitude car le nombre de runs des modèles de complexité intermédiaire est moins limité par le temps de calcul que pour les modèles complexes.

¹² Les émissions négatives brutes sont supérieures aux émissions négatives nettes car elles doivent compenser les émissions de CO₂ qui subsistent (sauf dans le cas où il y aurait zéro émission). Ce sont bien les émissions négatives brutes qui sont pertinentes à quantifier car ce sont elles, et non pas les émissions négatives nettes, qui conditionnent le besoin en technologies de capture et les besoins de stockage. En particulier, des technologies de capture et stockage peuvent être nécessaires avant le moment où les émissions nettes deviennent négatives, et les besoins de stockage sont a priori supérieurs à la somme des émissions nettes négatives.

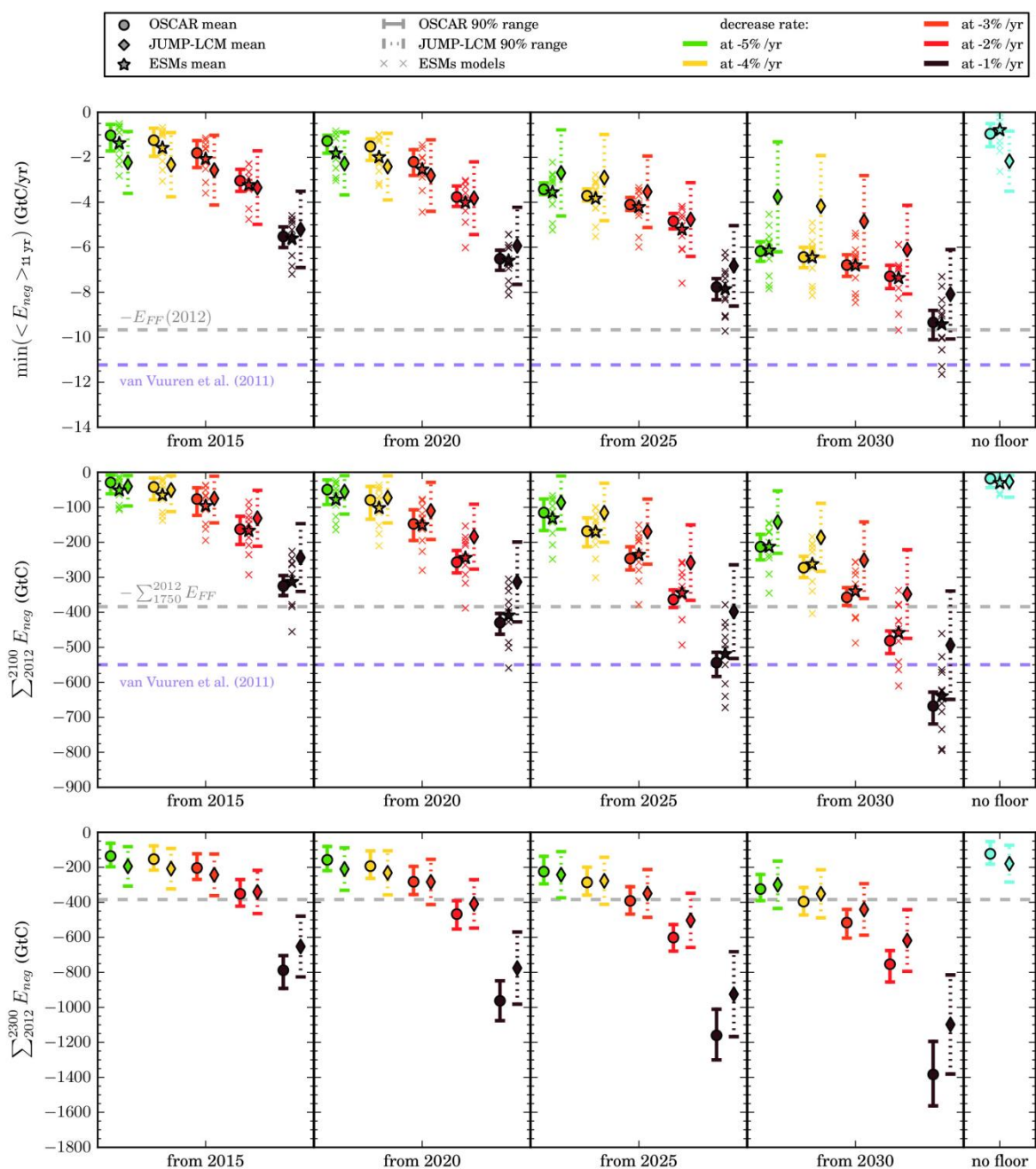


Figure 8 : Negative emissions requirements for all mitigation floor scenarios. Top panel shows the maximum yearly flux of carbon removal required during at least a decade (at any time between 2012 and 2300, see Figure S1). Middle panel shows the cumulative carbon removal needed by the end of the 21st century, and bottom panel shows that cumulative removal by the end of the 23rd century. Each panel is broken-down into one subpanel per starting year of decrease of the mitigation floor. Inside each subpanel, colors correspond to the rate of decrease. Estimates by OSCAR (mean: circle marker; 90% range: continuous line), JUMP-LCM (mean: diamond marker; 90% range: dotted line) and ESMs (mean: star marker; individual models: cross markers) are shown. Estimates of the negative emissions requirements when no mitigation floor is considered (i.e. of net negative emissions) are also shown in the right-most panels (blue). CO₂ emissions from fossil-fuel burning in 2012 and cumulative fossil emissions since preindustrial up to 2012 are given (light gray) for comparison. Gross negative emissions in the "original" RCP 2.6 built via integrated assessment by van Vuuren et al. (2011) are also provided (purple). (Gasser et al., 2015)

Il ressort de l'analyse précédente que l'atténuation « conventionnelle » ambitieuse et précoce limite le risque d'avoir « besoin » de quantités importantes d'émissions négatives. Or les technologies d'émissions négatives (leurs coûts, leurs potentiels et leurs effets secondaires) sont très incertaines.

Ainsi l'atténuation « conventionnelle » ambitieuse et précoce peut être vue comme une assurance contre les incertitudes sur ces technologies. Dans mes perspectives de recherche, je propose de quantifier la valeur de cette assurance (voir Partie III).

Jusqu'ici nous avons étudié les implications de l'inertie à la réduction des émissions de CO₂, en « stylisant » à l'extrême la représentation de cette inertie par des fonctions « enveloppes » exponentielles ou linéaires. Ce qui suit « ouvre l'enveloppe » de la vitesse de décarbonisation de l'économie.

3.2. Les infrastructures dans les trajectoires de décarbonisation de l'économie

Dans ma thèse, je me suis concentrée sur les rigidités des marchés du travail comme facteur limitant la vitesse de décarbonisation et déterminant son coût (Guivarch et al., 2011). Depuis la thèse, je me suis intéressée au second facteur de production traditionnellement considéré: le capital. Je me suis en particulier intéressée à la question du capital existant comme facteur limitant la vitesse de décarbonisation de l'économie.

Le capital existant – infrastructures, capacités de production, équipements des ménages – conditionne les émissions futures liées à son utilisation, du fait des technologies qu'il incorpore. Or, certains types de capital ont des durées de vie¹³ longues : de l'ordre de la décennie pour les équipements des ménages, quelques décennies pour les centrales électriques ou unités de production industrielle, plusieurs décennies voire siècles pour les bâtiments ou infrastructures de transport et urbaines. S'il est utilisé jusqu'à la fin de sa durée de vie, le capital existant aujourd'hui peut donc conduire à des émissions de GES pendant les décennies à venir, et limiter la vitesse de décarbonisation de nos économies. Le capital existant représente donc un legs en termes d'émissions futures. Dans un article de 2010, Davis et al. ont quantifié ce legs dû aux infrastructures existantes directement émettrices de CO₂ (les centrales électriques, les véhicules, les unités de production industrielle). Ils ont évalué qu'il correspond à un réchauffement moyen de 1.3°C. Ils concluent « *sources of the most threatening emissions have yet to be built* », ce qui pourrait être interprété, de façon erronée, en déduisant que les politiques climatiques pour limiter le réchauffement sous la cible des 2°C peuvent ne pas tenir compte des infrastructures existantes.

Afin de clarifier les interprétations des résultats de Davis et al. en termes de politiques climatiques, dans l'article (Guivarch et Hallegatte, 2011), nous avons étendu leur méthodologie pour prendre en compte les infrastructures qui n'émettent pas directement de CO₂, mais qui perpétuent un fonctionnement économique carboné. Tandis que l'analyse initiale se limite à quantifier l'inertie due au capital d'offre d'énergie ou de services énergétiques¹⁴, son extension doit permettre de prendre en compte également l'inertie de la demande, qui est elle aussi liée aux infrastructures et capital installé, notamment leurs localisations. Par exemple, l'enveloppe des bâtiments conditionne sur le long-terme la demande énergétique pour le chauffage et la climatisation, la localisation des actifs immobiliers détermine les besoins de transport, et les infrastructures de transport influencent les parts modales. Etant donné les très longues durées de vie des bâtiments et infrastructures de transport (Shalizi et Lecocq, 2009), et l'inertie des formes urbaines (Jaccard and Rivers, 2007; Gusdorf et al., 2008), l'inertie de la demande de services énergétique pourrait être une plus grande contrainte pour la vitesse de décarbonisation que l'inertie du capital d'offre de services énergétiques. Nous illustrons cet effet

¹³ Si la notion de durée de vie du capital peut paraître intuitive, sa définition et sa mesure (tout comme celle du capital lui-même) pose en réalité des difficultés théoriques et pratiques importantes (voir par exemple OCDE, 2001), notamment car des investissements sont fait continuellement pour réparer ou transformer le capital existant et car des décisions d'abandon ou au contraire de prolongation de durée de vie de capital existant sont prises en fonction des conditions économiques ou politiques (on peut par exemple citer le choix d'arrêter ou au contraire de prolonger la durée de vie des centrales nucléaires).

¹⁴ Les services énergétiques sont les services associés à l'utilisation finale d'énergie, par exemple des passagers.kilomètres déplacés, ou des mètres carrés chauffés ou refroidis. Le capital d'offre de ces services sont par exemple les véhicules ou les chaudières. L'énergie étant un complément de ce capital pour produire les services énergétiques, il est potentiellement directement émetteur de CO₂ (si l'énergie utilisée est carbonée).

d'inertie additionnelle à travers l'exemple du transport. Nous trouvons un legs en termes d'émissions futures dues au capital existant significativement plus important que les estimations originales, de 35% supérieures en 2030 et 134% en 2060 (Figure 9). Nous concluons que les politiques climatiques qui contiendraient l'augmentation la température globale sous l'objectif des 2°C ne peuvent pas faire l'impasse sur le capital existant. Surmonter le legs du capital installé fait donc partie du défi climatique, qui nécessitera donc de forcer l'abandon prématuré ou la rénovation énergétique (« *retrofit* ») de capital existant, et de cibler les déterminants de la demande en services énergétiques, en particulier ceux liés à la localisation des infrastructures et activités.

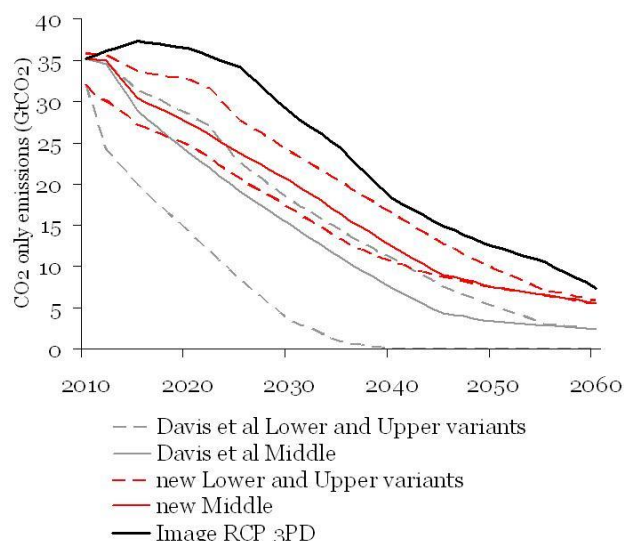


Figure 9: Scenarios of CO₂ emissions from existing infrastructure. The scenarios correspond to Davis et al. results, the new results from this article, and the RCP2.6 (Image RCP 3PD in the legend) scenario for comparison purposes. Dashed lines indicate total CO₂ emissions from upper and lower-bound scenarios. (Guivarch et Hallegatte, 2011).

L'importance du legs en termes d'émissions des infrastructures existantes débouche sur deux questions, liées au fait que les décisions d'investissement dans les infrastructures (à longue durée de vie) engendrent des coûts irrécupérables importants lors de la construction de l'infrastructure, d'où une irréversibilité de ces investissements ou tout du moins un coût à la réversibilité.

La première question porte sur le rôle des décisions d'investissement dans les infrastructures à longue durée de vie, non directement émettrices mais qui sont « complémentaires » de consommations plus ou moins émettrices, dans les politiques d'atténuation. Si l'on fait l'hypothèse que les émissions induites ne sont pas ou sont imparfaitement prise en compte dans les décisions d'investissement dans les infrastructures (Shalizi et Lecocq, 2009), le rôle de mesures pour orienter les investissements vers des infrastructures « complémentaires » de consommation peu émettrice (par exemple les infrastructures de transport en commun, vs. celles de transport individuel motorisé) dans un paquet de politique d'atténuation se pose. Nous illustrons ce rôle à travers l'exemple des infrastructures de transport dans le premier zoom ci-dessous.

La seconde question est celle de la rénovation énergétique (« *retrofit* ») de capital existant ou de son abandon prématuré (« *stranded assets* », ou actifs « échoués » ou dévalorisés). Dans les travaux résumés ici, je présente un exemple¹⁵ d'évaluation des barrières, et des politiques d'incitation, à la rénovation énergétique dans le second zoom ci-dessous.

¹⁵ Je ne traite pas de la question des « *stranded assets* ». Sur ce sujet voir par exemple Guivarch et Hood (2011) ou Johnson et al. (2015) sur l'abandon prématuré de centrales à charbon, McGlade et Ekins (2015) et van der Ploeg and Rezai (2016) sur les réserves d'énergies fossiles inexploitées, et Rozenberg et al. (2014) sur les effets distributifs intra- et inter-générationnels d'instruments de politiques de transition énergétique évitant ou non les « *stranded assets* ».

Notons ici que ces deux questions ne peuvent être traitées que par une modélisation du capital existant reposant sur une représentation explicite du stock de capital et de ses caractéristiques en termes de technologie et d'efficacité. Une représentation classique de la production avec une fonction KLE (capital, travail, énergie) avec un capital malléable ne permettrait pas d'évaluer les implications des décisions d'investissement irréversibles. Le modèle Imacim-R qui repose, au contraire, sur une représentation « putty-clay » du capital (voir encadré 2) est un outil adapté pour explorer cette question.

Zoom sur le secteur des transports dans une transition vers une économie bas-carbone

Les deux articles de ce zoom (Waisman et al., 2012 et Waisman et al., 2013) portent sur les interactions entre le secteur des transports, et en particulier les choix d'investissement dans les infrastructures de transport, et le reste de l'économie dans une transition vers une économie bas-carbone. Tous les deux utilisent le modèle Imacim-R monde. Contrairement à beaucoup des modèles économie-énergie-environnement utilisés pour évaluer les trajectoires d'atténuation, Imacim-R représente à la fois les déterminants technologiques et les déterminants comportementaux et infrastructurels de la mobilité. Les infrastructures de transport, spécifiques à chaque mode (transports en commun, mobilité individuelle motorisée, aérien) sont représentées de façon explicite. Elles influencent les choix modaux des ménages, qui résultent de la maximisation de l'utilité courante sous double contrainte de revenus et de budget « temps » de transport (Zahavi et Talvitie 1980 et Schafer 2012), car le stock d'infrastructure spécifique à chaque mode détermine la vitesse du passager.kilomètre marginal, selon la congestion sur l'infrastructure. La routine de décision d'investissement dans les infrastructures de transport modélisée « par défaut » consiste à suivre l'augmentation de la demande de mobilité de chaque mode, i.e. à se donner pour objectif d'éviter la congestion.

Dans l'article Waisman et al. (2012), nous analysons les coûts de la transition vers une économie bas-carbone, en prenant en compte la nature de second rang de l'économie. Nous mettons en évidence les conséquences sur les coûts de l'atténuation des interactions entre a) l'inertie des systèmes techniques, notamment la longue durée de vie des infrastructures de transport; et b) les anticipations imparfaites des prix futurs présidant aux choix d'investissement. L'exercice de modélisation quantifie i) le risque de coûts de transition élevés d'une politique d'atténuation fondée sur la seule tarification du carbone, du fait des interactions entre inertie et anticipations imparfaites; ii) les possibilités de réduction de ces coûts si des sous-optimalités du scénario de référence sont corrigées. En particulier, nous montrons que réallouer les investissements vers des infrastructures de transport bas-carbone réduit le prix du carbone nécessaire et le coût macroéconomique de l'atteinte d'une cible de réduction des émissions de CO₂ donnée, par rapport à un cas où les politiques d'investissement dans les infrastructures de transport « suivent » l'augmentation de la mobilité pour chaque mode (Figure 10). Les effets se matérialisent surtout à long-terme, du fait de l'inertie du stock d'infrastructure qui n'est modifié qu'à la marge chaque année.

Les mécanismes à l'œuvre sont les suivants. A court-terme, les prix du carbone ne sont pas suffisants pour ralentir significativement l'augmentation de la mobilité en voiture à l'échelle mondiale. Dès lors, lorsque les choix d'investissement dans les infrastructures de transport suivent la demande (i.e. visent à éviter la congestion), les investissements dans le mode routier se poursuivent largement. Lorsque les prix du carbone augmentent, le report modal des véhicules privés vers les transports en commun est contraint par le stock d'infrastructure et pour atteindre un niveau de réduction des émissions donné, il faut un prix du carbone d'autant plus élevé qu'il faut déclencher ailleurs dans l'économie les réductions d'émissions qui n'ont pas lieu du fait de la contrainte au report modal. Dans le cas où les politiques d'investissement dans les infrastructures réallouent précocement les investissements vers des infrastructures de transport bas-carbone, le report modal n'est pas, ou est moins, contraint et pour atteindre un niveau de réduction des émissions donné, un prix moindre du carbone sera nécessaire. Bien évidemment, si l'ensemble des agents, ménages et investisseurs dans les infrastructures de transport, anticipaient toujours parfaitement (et avaient toujours parfaitement anticipé) les prix futurs, et en particulier les prix du carbone futurs, ces mécanismes ne joueraient pas puisque les choix

d'investissement seraient optimaux. Néanmoins, l'hypothèse d'une anticipation parfaite des prix futurs, en particulier du carbone, semble peu réaliste notamment du fait de la difficulté à rendre crédible un signal prix de très long-terme.

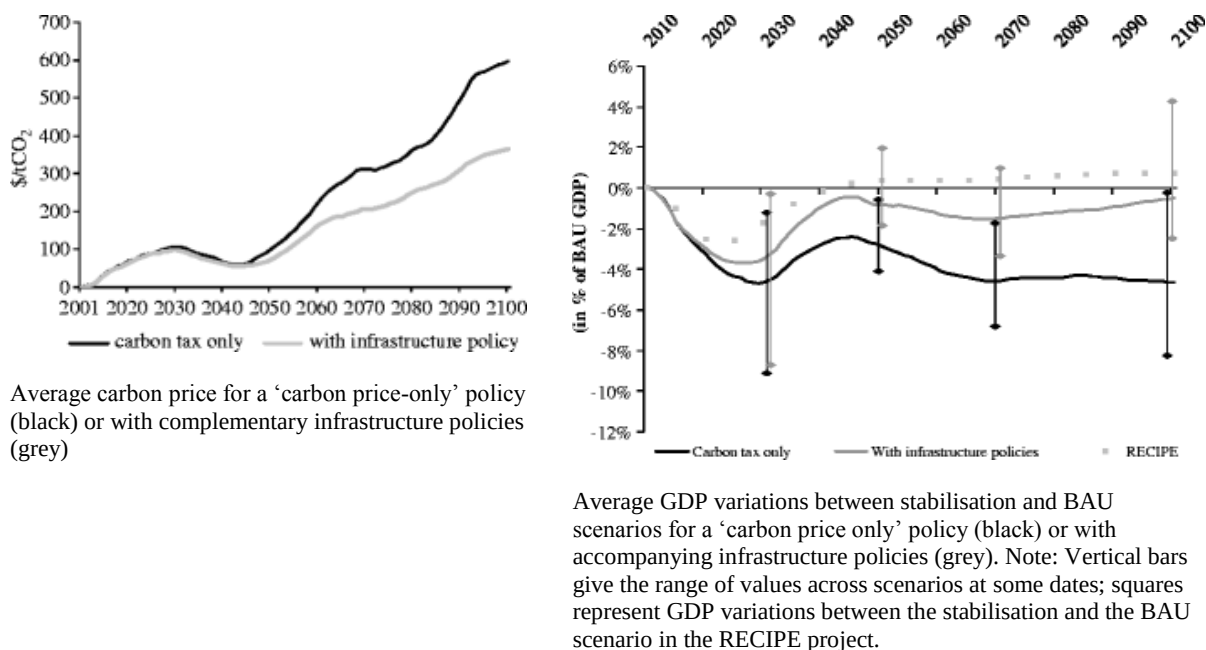


Figure 10: Prix du carbone (panneau de gauche) et le coût macroéconomique (panneau de droite) pour une cible de réduction des émissions de CO₂ donnée. (Waisman et al., 2012).

Le second article, Waisman et al. (2013), approfondit l'analyse des résultats sur le potentiel de mesures jouant sur les infrastructures de transport, en faveur des modes peu intensifs en carbone, et réduisant les besoins de mobilité, dans la transition vers une économie bas-carbone.

La comparaison de scénarios avec prix du carbone seul (scénario S1 dans le tableau 1), ou combinant prix du carbone et mesures sur le transport (scénario S2 dans le tableau 1), permet de montrer que des mesures favorisant le report modal vers des modes peu intensifs en carbone et le découplage entre besoin de mobilité et activité économique modifient la distribution entre secteurs des efforts de réduction des émissions nécessaires pour atteindre une cible de réduction d'émission donnée. Pour atteindre un niveau d'émission donné, si le report modal est contraint, un prix du carbone plus élevé est nécessaire pour déclencher des réductions d'émissions ailleurs dans l'économie, ce qui engendre un coût macroéconomique. En levant (partiellement) la contrainte de report modal, d'avantage de réduction des émissions ont lieu dans le secteur des transports, allégeant ainsi les efforts d'abattement dans le reste de l'économie et réduisant le coût macroéconomique de l'atteinte d'une trajectoire d'émissions donnée.

		2010–2050		2050–2100	
Transports	S1	0.4	[0.1–0.7]	–0.3	[–0.6––0.1]
	S2	0.2	[0.0–0.5]	–0.4	[–0.7––0.1]
Electricity	S1	–3.7	[–5.1––2.6]	–4.6	[–6.0––3.5]
	S2	–3.4	[–4.5––2.6]	–4.0	[–5.5––2.0]
Industry	S1	–1.3	[–1.6––1.0]	–3.7	[–4.5––2.8]
	S2	–1.2	[–1.4––0.9]	–3.0	[–3.8––2.3]
Residential	S1	–0.5	[–0.7––0.3]	–0.8	[–1.0––0.5]
	S2	–0.4	[–0.6––0.2]	–0.8	[–1.0––0.4]
Other sectors	S1	–1.7	[–2.4––0.8]	–2.9	[–3.4––1.8]
	S2	–1.7	[–2.4––1.3]	–2.4	[–2.9––1.2]

Notes: Figures in bold denote average values across scenario sets. Figures in parentheses denote low and upper bounds.

Mean annual emissions reductions in S1 and S2 scenarios, 2010–2050 and 2050–2100 (%)

Tableau 1 : Réductions annuelles moyennes des émissions de CO₂ par secteur, dans les scénarios avec prix du carbone seul (S1), ou combinant prix du carbone et mesures sur le transport (S2). (Waisman et al., 2013).

Zoom sur les politiques pour la rénovation thermique des bâtiments

Dans les articles Giraudet et al. (2011) et Giraudet et al. (2012), nous traitons de la rénovation énergétique du capital existant, à travers le cas des bâtiments résidentiels en France. Les deux articles s'appuient sur le modèle Res-IRF (qui représente le secteur résidentiel dans le modèle Imacsim-R France) qui a été développé pour représenter et quantifier l'effet des barrières à l'efficacité énergétique et évaluer *ex ante* les instruments de politique et leur superposition.

Bien que le secteur résidentiel soit reconnu comme un des secteurs avec un potentiel important d'amélioration de l'efficacité énergétique et de réduction des émissions de GES, sa représentation dans les modèles de prospective est souvent limitée dans sa représentation des dynamiques technologiques et comportementales caractérisant ce secteur (Fragnière et al., 2016). Le modèle Res-IRF vise à pallier cette limitation. Il représente: (i) le parc de bâtiments résidentiel, ses caractéristiques thermiques, et la dynamique de construction, (ii) les décisions de rénovation thermique des bâtiments existants, (iii) l'ajustement de l'utilisation des équipements de chauffage suite à une rénovation thermique d'un bâtiment (effet rebond direct¹⁶). Il est calibré sur le parc de bâtiments résidentiels français de 2008.

Notons que les projections que nous avons réalisées confirment que la question centrale est bien la rénovation du capital existant : plus de 60% des m² de 2050 existent déjà aujourd'hui.

Giraudet et al. (2012) décrit le modèle Res-IRF, un modèle hybride développé pour évaluer la demande d'énergie future du secteur résidentiel en France. Ce modèle a les caractéristiques suivantes : (i) une séparation entre efficacité énergétique, i.e. l'investissement dans des technologies d'efficacité énergétique, et la sobriété énergétique, i.e. les changements d'usage des équipements utilisant de l'énergie; ce qui permet d'évaluer l'effet rebond; (ii) la prise en compte de barrière à l'efficacité énergétique, sous la forme de coûts intangibles, d'hétérogénéité des consommateurs et de processus d'apprentissage; (iii) des choix endogènes de rénovation thermique, permettant de représenter

¹⁶ L'effet rebond direct (voir Greening et al., 2000, pour une revue des effets rebonds) correspond à l'accroissement de la demande d'un service énergétique suite à l'amélioration de l'efficacité énergétique de la fourniture de ce service. Cet effet est dû à une réduction du prix du service énergétique du fait de la meilleure efficacité énergétique. Cet effet rebond conduit à une moindre diminution de la consommation d'énergie que celle « attendue » qui serait proportionnelle à la réduction de l'intensité énergétique de la fourniture du service énergétique.

l'arbitrage entre qualité et quantité de rénovation. Une application de ce modèle au parc de logements français montre que, par rapport à une réduction de demande finale d'énergie des bâtiments existants de 37% à l'horizon 2050 dans un scénario de « business-as-usual », une réduction supplémentaire de 21% pourrait être atteinte si les barrières à l'efficacité énergétique et à la sobriété étaient évitées (Figure 11).

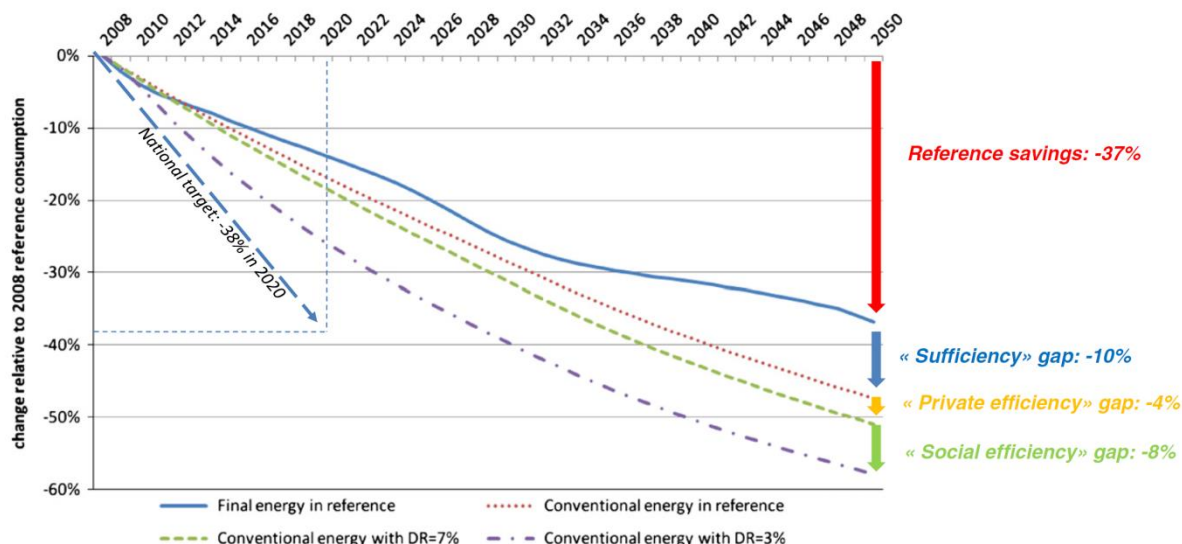


Fig. 19. Techno-economic potential for energy conservation in existing dwellings.

Figure 11: Potentiels de réductions de consommation d'énergie finale dans le parc de bâtiments existants, et barrières à l'efficacité énergétique. (Giraudet et al., 2012).

Le second article, Giraudet et al. (2011), évalue l'effet sur la consommation d'énergie pour le chauffage dans le secteur résidentiel de politiques mises en place (crédit d'impôt, éco-prêt à taux zéro, réglementation thermique) ou proposées (taxe carbone, obligation de rénovation thermique), et le compare à l'objectif du Grenelle de réduire de 38%, par rapport à 2008, la consommation d'énergie primaire des bâtiments existants à l'horizon 2020. Les simulations montrent que :

- (i) les politiques en faveur de l'efficacité énergétique, en l'absence de tarification du carbone, engendrent un effet rebond absolu (i.e. comparé à la situation de 2008) de l'ordre de 25% à 35% à l'horizon 2050 selon le type de politique considéré. Cette quantification de l'effet rebond correspond à la fourchette haute des estimations empiriques de l'effet rebond pour le chauffage (Sorrell et al., 2009).
- (ii) les interactions entre les instruments de politiques sont approximativement additives en termes de réduction d'émissions induites (cela se lit sur le tableau 2 dans la quasi-additivité des réductions de consommation d'énergie supplémentaires par rapport au scénario de référence).
- (iii) la combinaison des politiques mises en place ne permet pas d'atteindre l'objectif annoncé.

	Evolution of primary energy, including rebound, compared to 2008				Evolution of final energy, compared to 2008	
	Specific consumption in existing buildings		Total consumption in the total stock		Total consumption, including rebound	
	2020	2050	2020	2050	2020	2050
Benchmark objective	-38%					
Ref Reference scenario	-8.1%	-19.5%	1.2%	5.2%	-3.6%	-10.0%
<i>Single policies</i>						
C Tax credits	-9.2%	-20.7%	0.2%	4.2%	-4.8%	-10.9%
L Zero rate loans	-9.0%	-20.4%	0.4%	4.4%	-4.5%	-10.7%
R Building code regulation	-8.1%	-19.5%	-5.0%	-23.4%	-8.3%	-31.2%
T Carbon tax	-14.5%	-35.2%	-5.3%	-13.5%	-11.9%	-31.8%
O Retrofitting obligation	-10.7%	-29.1%	-1.2%	-3.0%	-5.9%	-17.3%
<i>Proposed packages</i>						
E Combination of C,L,R	-10.3%	-22.1%	-7.1%	-25.6%	-10.5%	-32.9%
S1 CLR enriched with T	-16.9%	-37.3%	-13.7%	-39.5%	-18.8%	-49.1%
S2 CLR enriched with O	-12.7%	-31.0%	-9.4%	-33.3%	-12.5%	-39.5%
S3 CLR enriched with T and O	-19.3%	-43.8%	-15.9%	-45.0%	-20.7%	-54.8%

Tableau 2: Evolution de l'énergie primaire et finale en 2020 et 2050, par rapport à 2008, pour différents instruments de politiques et leurs combinaisons. (Giraudet et al., 2011).

3.3. Articulation court-terme long-terme

Dans cette troisième section, j'aborde le fait qu'inerties et irréversibilités mettent la dimension temporelle au cœur de la question climatique et font de l'articulation dynamique entre court-terme et long-terme des politiques climatiques et de leurs effets une question cruciale.

L'articulation court-terme/long-terme est depuis le début au cœur de l'économie du changement climatique, puisque les coûts et les bénéfices (i.e. les dommages évités) de l'atténuation ont des temporalités différentes faisant essentiellement porter les coûts sur le court et moyen terme pour des bénéfices à long-terme. Cela explique, notamment, l'importance des recherches sur l'actualisation en économie du changement climatique (voir par exemple Gollier, 2013).

Cette question de l'articulation court-terme long-terme était déjà présente dans ma thèse, où je me suis attachée à analyser la temporalité des coûts de l'atténuation.

Depuis la thèse, je l'ai abordé au prisme d'une question spécifique, celle des co-bénéfices (ou co-coûts) des politiques d'atténuation. Le bénéfice premier des politiques d'atténuation réside dans la réduction des dommages dus au changement climatique. Mais ces politiques ont des conséquences sur la santé, l'économie, la société, au-delà de celles résultant de la réduction des émissions de GES (voir Urge-Vorsatz et al., 2014 pour une revue). On parle de co-bénéfices pour des conséquences positives, de co-coûts pour des conséquences négatives. L'amélioration de la qualité de l'air local est un exemple de co-bénéfice de politiques d'atténuation (car les polluants locaux sont souvent co-émis avec les GES).

Dans Cassen et al., (2015) nous faisons le parallèle entre la montée de la question des co-bénéfices dans les analyses du changement climatique et l'importance de ces co-bénéfices dans les motivations pour l'action. En particulier, nous discutons du fait que les co-bénéfices, contrairement au climat, ne constituent pas un bien public global, en raison de leur horizon spatiotemporel. En effet, les bénéfices directs apportés par la réduction des gaz à effet de serre sont avant tout globaux alors que les co-bénéfices, comme la réduction de la pollution de l'air, sont directement observables à l'échelle locale ou régionale. Les co-bénéfices se matérialisent souvent à court terme, alors que les bénéfices directs des réductions des émissions peuvent prendre des décennies avant d'être visibles. Dès lors les difficultés liées au phénomène de passager clandestin (free-riding) et à la distribution intergénérationnelle des coûts et des bénéfices, qui freinent les politiques d'atténuation, ne s'appliquent pas ou peu pour les co-bénéfices, ce qui peut motiver l'action.

Néanmoins nous montrons, dans Guivarch et al. (2015) que dans le cas des co-bénéfices en termes de sécurité énergétique les effets sont en réalité plus complexes, et en particulier que les effets de court-terme et de plus long-terme peuvent être contradictoires.

L'amélioration de la sécurité énergétique est souvent présentée comme un co-bénéfice des politiques d'atténuation. Notre article évalue cette assertion. Nous analysons si une politique d'atténuation améliorerait la sécurité énergétique, en prenant en compte la nature multidimensionnelle du concept de sécurité énergétique ainsi que les incertitudes sur les déterminants des systèmes énergétiques futurs. Nous utilisons une grille d'analyse multidimensionnelle pour mesurer la sécurité énergétique, et un ensemble de scénarios pour explorer l'espace des incertitudes. Nous considérons 3 dimensions de la sécurité énergétique (souveraineté, robustesse, résilience) et 3 systèmes énergétiques vitaux (offre d'énergie primaire, énergies fossiles et électricité). Les résultats, pour l'Europe, montrent qu'il n'y a pas d'effet univoque de la politique d'atténuation sur l'ensemble des dimensions de la sécurité énergétique (Figure 12). Par ailleurs, la dimension temporelle est importante : l'effet de la politique climatique est mitigé à court-terme, mais favorable sur la quasi-totalité des indicateurs de sécurité énergétique à moyen-terme. A très long-terme, il y a de nouveau des risques de dégradation de certains indicateurs de sécurité énergétique.

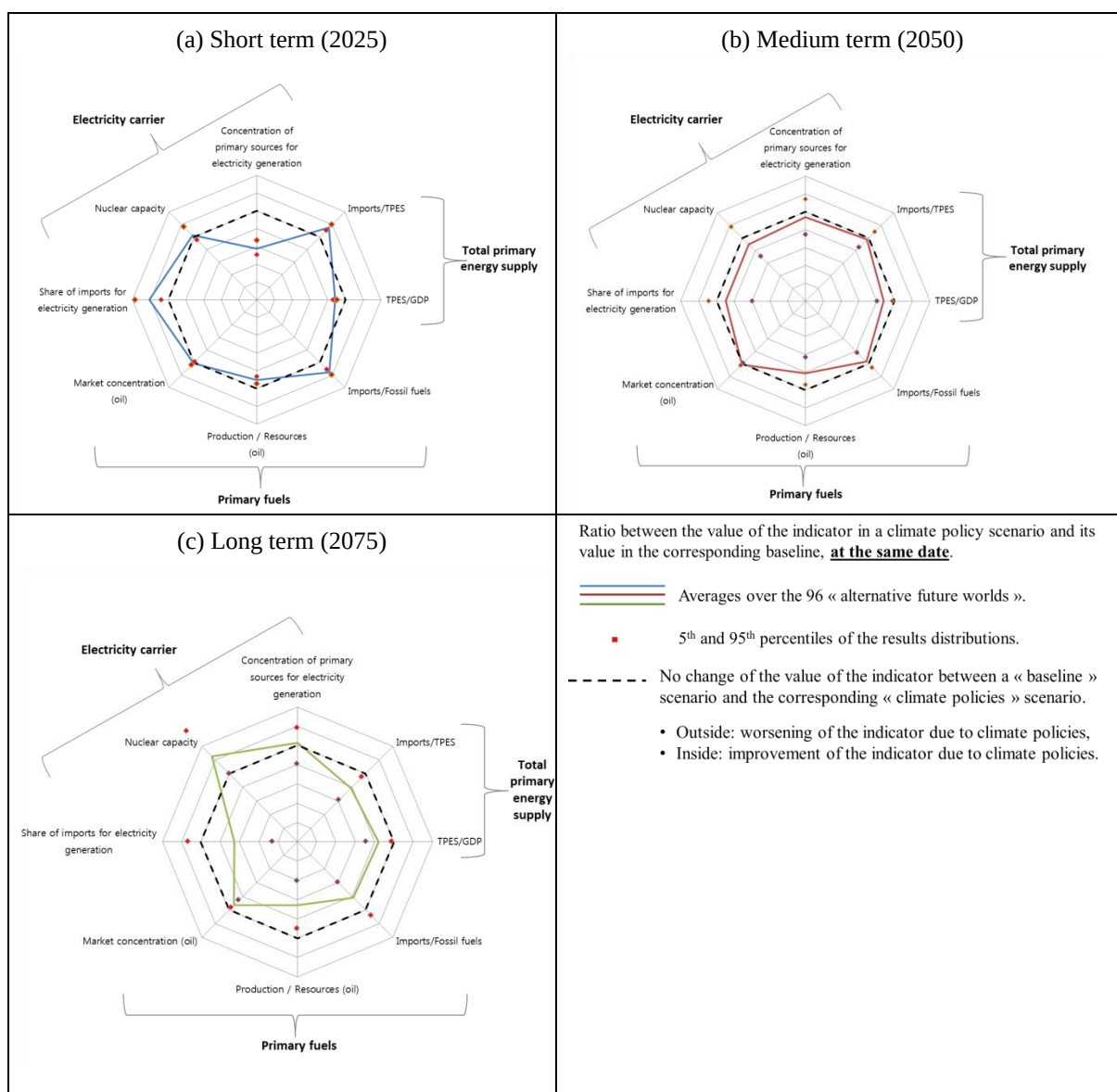


Figure 12: Effets de la politique climatique sur un jeu d'indicateurs de sécurité énergétique, pour l'Europe, à trois horizons temporels. (Guivarch et al., 2015).

La question de l'articulation court-terme long-terme se trouve également au cœur de l'architecture climatique internationale, qui fait apparaître un décalage important de niveaux d'ambitions entre objectifs de long-terme (2°C voire 1.5°C) et de court terme (réductions d'émissions globales faibles si l'on agrège les contributions nationales annoncées à l'horizon 2030). Cela soulève des questions (i) de risque d'accroissement du legs en termes d'émissions du capital installée à l'horizon 2030, (ii) de risque liés à des trajectoires d'atténuation reposant sur des réductions rapides après 2030 et un recours massif à des émissions négatives, et (iii) de conditions dans lesquelles le niveau d'ambition de court terme pourrait être relevé. J'aborderai ces questions dans mes perspectives de recherche (voir Partie III).

4. Incertitudes dans les modèles et scénarios pour l'évaluation des trajectoires d'émissions de GES et des politiques climatiques

L'incertitude, contrairement au risque, est une situation dans laquelle nos connaissances sont insuffisantes pour déterminer les probabilités des différents événements possibles (Knight, 1921). Le terme d'ambiguïté (et d'aversion à l'ambiguïté) en économie correspond à cette situation d'incertitude knightienne dans laquelle les probabilités sont inconnues. L'incertitude est qualifiée de radicale lorsqu'on est même incapable d'établir la liste des événements possibles liés à un aléa. La question du changement climatique relève par de nombreux aspects de l'incertitude radicale (Heal et Millner, 2014). Les sources d'incertitude relèvent à la fois d'éléments scientifiques et d'éléments socio-économiques. La connaissance scientifique du fonctionnement du système-Terre est encore incomplète. Par exemple, malgré des avancées significatives dans la science du climat et une confiance accrue dans la précision de l'intervalle lui-même, l'intervalle « probable » de la valeur de la sensibilité climatique (1,5-4,5°C) ne s'est pas réduite depuis le premier rapport du GIEC. Par ailleurs, nous avons une compréhension imparfaite de l'ensemble des impacts du changement climatique, de la façon dont nos sociétés vont y répondre et il n'y a pas de consensus sur la façon dont on devrait valoriser ces impacts.

Ces incertitudes (radicales) représentent un défi pour la décision face au changement climatique. Je reviendrai sur cette question de la décision sous incertitude dans mes perspectives de recherche. Les incertitudes représentent également un défi pour la modélisation qui vise à fournir des éclairages à la prise de décision. Les travaux que je présente ci-dessous traitent de ce défi de la prise en compte des incertitudes dans les études modélisées.

Traduite en termes de modélisation, la définition de l'incertitude radicale correspond à une situation dans laquelle les analystes ne connaissent pas ou les parties prenantes à la décision ne peuvent pas se mettre d'accord sur (1) le modèle approprié pour décrire le système à l'étude, (2) les distributions de probabilités pour représenter les paramètres incertains du modèle, ou (3) comment valoriser les différents résultats possibles.

Dans cette situation, la modélisation devient exploratoire (Bankes, 1993), et abandonne son ambition prédictive. Quand une connaissance incomplète ou des incertitudes irréductibles rendent impossible la construction d'un substitut modélisé pour le système à l'étude, les modélisateurs doivent faire des hypothèses sur les mécanismes à l'œuvre. Si le modèle résultant ne peut pas être pris comme une image fiable du système étudié, il permet des expériences numériques qui révèlent comment le monde se comporterait si les différentes hypothèses formulées étaient justes. Ces expériences permettent d'explorer les implications d'hypothèses alternatives.

Analyser l'incertitude, c'est ainsi essentiellement évoquer plusieurs futurs. Plusieurs approches de modélisation existent, et se différencient par le fait qu'elles représentent l'incertitude soit en considérant plusieurs futurs disjoints, soit en représentant des événements stochastiques.

Les analyses de sensibilités (Saltelli et al., 2000) et la construction de scénarios¹⁷ constituent le premier genre d'approche, avec une indépendance logique entre chaque futur évoqué. Lorsque l'on fait des statistiques sur un grand nombre de simulations, on parle de méthodes d'ensembles. Lorsque les paramètres de l'ensemble sont tirés au hasard en fonction d'une distribution de probabilité (et non systématiquement en suivant un plan d'expérience), on parle de méthode de Monte Carlo.

La programmation dynamique constitue une seconde approche. Contrairement à l'analyse de sensibilité les chemins futurs sont calculés tous ensemble et non de façon indépendante. Le résultat vise une interprétation prescriptive, puisque les calculs aboutissent à un plan d'action optimal, déterminant de façon univoque ce qu'il faut faire à court terme mais aussi comment adapter l'action en fonction d'éventuelle arrivée d'information sur des éléments incertains (on parle alors de décision

¹⁷ Les scénarios peuvent se définir comme “internally consistent and challenging descriptions of possible futures” (van der Heijden, 1996).

séquentielle, voir par exemple Hammitt et al., 1992 et Ha-Duong et al., 1997 pour des applications au cas du changement climatique).

Mes travaux présentés dans cette partie, s'inscrivent dans la première approche, de construction de scénarios, et plus spécifiquement dans la construction de scénarios socioéconomiques pour l'analyse des trajectoires d'émissions et des politiques de réduction de ces émissions. Ils se situent ainsi dans le cadre des scénarios pour la recherche sur le climat (voir encadré 1 en section 2), et en particulier celui de la nouvelle génération de scénarios, les SSP. S'il fallait justifier l'intérêt d'explorer l'incertitude des trajectoires d'émission, la Figure 13 ci-dessous montre qu'elle est une source d'incertitude importante, prépondérante à partir du milieu du siècle, pour le changement climatique auquel nos sociétés seront confrontées.

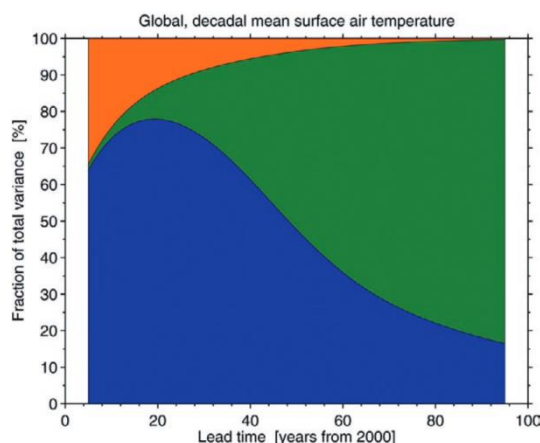


Figure 13 : Sources de l'incertitude dans la température moyenne globale en fonction du temps : incertitude sur les conditions initiales (en orange en haut), incertitude sur le scénario d'émissions (en vert au milieu) et incertitude sur le modèle de climat (en bleu en bas). Source : Hawkins et Sutton (2009).

Dans ce cadre de la construction de scénarios pour l'analyse ex-ante de trajectoires et politiques d'atténuation, mes travaux apportent des contributions de trois ordres. Tout d'abord, j'ai contribué à des innovations méthodologiques pour la construction et l'analyse d'ensembles de scénarios socio-économiques: (i) l'adaptation d'une méthode quantitative pour informer le choix d'un petit nombre de scénarios contrastés pour explorer l'espace des incertitudes, et (ii) l'amélioration d'un algorithme de « scenario discovery » pour analyser la diversité des combinaisons d'éléments incertains pouvant conduire à des résultats similaires. La section suivante présente ces contributions méthodologiques. Ensuite, l'application de ces méthodes a permis d'obtenir des résultats nouveaux ou de revisiter certains résultats anciens. Trois exemples sont détaillés dans la seconde section. Le premier exemple explore la diversité socioéconomique des trajectoires conduisant à des émissions cumulées élevées, et montre qu'émissions élevées ne vont pas forcément de pair avec croissance élevée. Le second exemple analyse les déterminants des coûts de l'atténuation d'une part et du niveau de richesse absolu atteint sous contrainte carbone de l'autre, et montre que ces déterminants diffèrent. Le troisième exemple met en évidence le co-bénéfice en termes d'assurance face à l'incertitude sur les réserves de pétrole que représentent les politiques d'atténuation. Enfin, certains de mes travaux proposent une mise en perspective ou une synthèse des développements méthodologiques récents pour le traitement de l'incertitude dans la construction et l'analyse de scénarios. Ces travaux sont évoqués à la fin de cette partie.

4.1. Modèles, scénarios et incertitudes : contributions méthodologiques

Une des difficultés majeures réside dans la grande dimension de l'espace des incertitudes qu'il s'agit d'explorer, et du caractère souvent « radical » des incertitudes en jeu : la démographie future est incertaine (il existe par exemple un débat entre Gerland et al. 2014 et Lutz et al. 2014 sur la probabilité d'un pic de la population mondiale, suivi par sa décroissance, au cours du 21^{ème} siècle), la croissance

économique future est incertaine (Christensen et al., 2016), les technologies futures le sont également (par exemple Baker et al., 2015 montrent qu'il n'y a pas de consensus entre experts sur l'évolution du coût des technologies bas-carbone ; Fuss et al., 2014 soulignent que la faisabilité et les potentiels des technologies d'émissions négatives ne sont pas prouvés), etc.

Face à cette « malédiction de la dimension », la méthode conventionnelle de prise en compte de l'incertitude dans les exercices de modélisation, la méthode de Monte Carlo, qui consiste à associer une distribution de probabilité (éventuellement subjective¹⁸) à chaque paramètre d'entrée du modèle considéré et à faire N runs du modèle en tirant les valeurs de chaque paramètre dans ces distributions, se trouve limitée du fait du très grand nombre N de runs qu'il faudrait pouvoir réaliser pour prendre en compte l'ensemble des paramètres incertains en jeu.

Dès lors, dans les communautés de modélisation intégrée, s'est développée la pratique des « scenario axes » (van't Klooster et van Asselt, 2006) ou de « story-and-simulation » (Alcamo, 2008). Cette approche consiste à faire développer par une assemblée d'experts de différents domaines et/ou de parties prenantes à la décision quelques « histoires » cohérentes et plausibles des évolutions futures alternatives de l'objet d'étude, sur la base de leurs intuitions quant aux forces motrices les plus importantes pour ces évolutions futures. Des modélisateurs produisent ensuite des projections quantitatives fondées sur ces « histoires ». Cette approche a été utilisée dans la communauté de recherche sur le climat, tant pour les SRES (Nakicenovic et al., 2000) que pour la nouvelle génération de scénarios socio-économiques pour la recherche sur le climat, les SSP, Shared Socioeconomic Pathways (Ebi et al., 2014 ; O'Neill et al., 2015).

Pourtant, cette approche ne permet qu'une exploration très partielle, et arbitraire, de l'espace des incertitudes. Elle pourrait échouer à focaliser l'analyse sur les forces motrices les plus importantes. Par exemple, des mécanismes de rétroactions pourraient sembler négligeables *a priori*, mais se révéler cruciaux dans une étude plus approfondie. C'est pourquoi une sélection *a priori* des forces motrices principales, sur la base des intuitions d'experts, semble insuffisante et devrait être complétée par une analyse qui met en lumière les facteurs incertains principaux pour l'évolution du système à l'étude.

Nous avons proposé une méthode pour approfondir ainsi l'exploration de l'espace des incertitudes et l'avons appliquée au développement des SSP (Rozenberg et al., 2014). Les SSP visent à explorer l'espace des défis à l'atténuation et à l'adaptation avec un petit nombre de scénario qui serviront à coordonner la recherche sur le climat, et à communiquer ses résultats (encadré 1 en section 2).

La méthode que nous proposons est importée du champ du « robust decision making » (prise de décision robuste) (Lempert, 2002; Lempert et al., 2003) qui vise à aider les décideurs à identifier des stratégies robustes, c'est-à-dire peu vulnérables aux incertitudes, en mettant en lumière les cas (ou scénarios) dans lesquels une stratégie donnée n'atteint pas son objectif. Ce « robust decision making » s'appuie sur une méthode de développement de scénarios assistée par ordinateur, le “scenario discovery cluster analysis”, qui applique des algorithmes statistiques à des bases de données de résultats de simulations pour caractériser les combinaisons de facteurs incertains (ou « déterminants ») les plus prédictives d'un certain type de résultat, en l'occurrence du fait qu'une stratégie donnée n'atteigne pas son objectif (Lempert et al., 2006). En d'autres termes, le “scenario discovery” est une manière systématique pour trouver quelles combinaisons de paramètres d'entrée d'un modèle conduisent à un résultat spécifique, par exemple les cas où une variable de sortie donnée est au-dessous ou en-dessous d'un seuil défini, ou plus généralement, les cas où les variables de sorties sont localisées dans un domaine spécifique de l'espace des résultats.

Notre importation de cette méthode de “scenario discovery” pour le développement des SSP, propose de développer les SSP avec une approche « à l'envers », inversant l'ordre d'articulation entre le qualitatif et le quantitatif. Notre méthode procède en trois étapes :

¹⁸ Une autre difficulté vient du caractère incertain, et non simplement risqué, des valeurs des paramètres à considérer. D'où le recours à des probabilités subjectives et des méthodes bayésiennes (Cooke, 2015).

(i) une identification *a priori* des forces motrices *potentielles* (ou facteurs incertains) des évolutions futures du système économie-énergie-climat, telles que la croissance de la population ou les réserves d'énergie fossile (Figure 14).

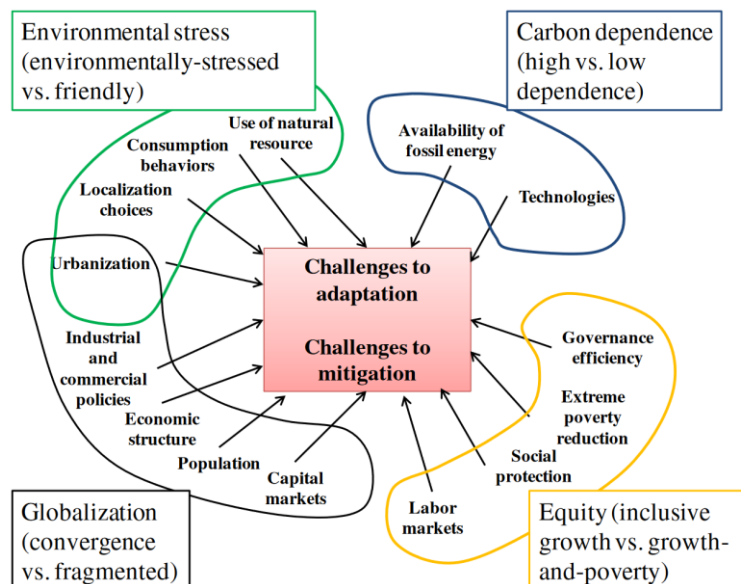
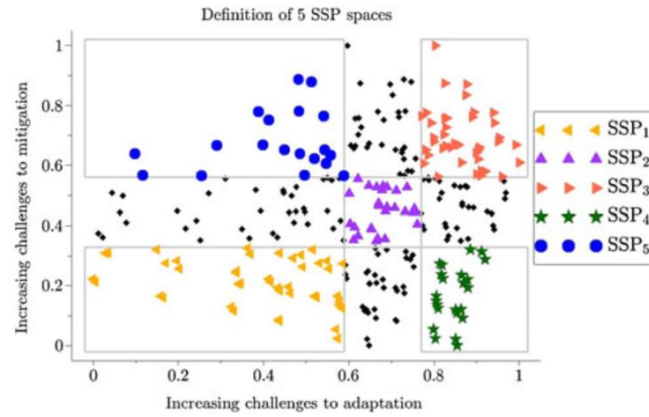


Fig. 1 Identified drivers of the challenges to mitigation and adaptation, in the four main dimensions

Figure 14 : Forces motrices *potentielles* (ou facteurs incertains) des évolutions futures du système économie-énergie-climat. (Rozenberg et al., 2014).

(ii) un exercice de modélisation pour transformer ces forces motrices en un ensemble de scénarios. Dans cet exercice, les forces motrices sont traduites en des paramètres, ou groupes de paramètres, d'un modèle du système étudié (le modèle Imaclim-R dans notre cas). Des variantes de valeurs pour ces paramètres sont construites. Puis toutes les variantes sont combinées entre elles pour construire un ensemble de runs du modèle, ou base de données de plusieurs centaines de scénarios.

(iii) une sélection *a posteriori* d'un petit nombre de scénarios dans cette base de données, à l'aide d'un algorithme de "scenario discovery". L'ensemble des scénarios est projeté dans l'espace des défis pour l'atténuation et pour l'adaptation (Figure 15), puis la méthode de « scenario discovery » permet d'identifier quelles sont les combinaisons de facteurs incertains qui sont les plus prédictives et représentatives de chacun des domaines de cet espace des défis.



Capacities to adapt and to mitigate that define the five SSP spaces and the results of our 286 model runs arrayed in this space

Figure 15: Projection de l'ensemble des scénarios dans l'espace des défis pour l'atténuation et pour l'adaptation. (Rozenberg et al., 2014).

Dans notre application de cette approche de développement des SSPs “à l'envers”, nous trouvons que les facteurs de sobriété énergétique, d'équité, de convergence économique et d'évolution démographique sont les plus importants pour distinguer les scénarios en termes de défis futurs à l'atténuation et à l'adaptation (Tableau 3). Les facteurs portants sur les technologies ou les ressources fossiles sont relativement moins importants pour distinguer les scénarios en termes de défis futurs à l'atténuation et à l'adaptation. Ces derniers facteurs sont très étudiés dans les modélisations pour l'analyse de l'atténuation (Clarke et al., 2014 ; Kriegler et al., 2014 ; Kriegler et al., 2016) ; nos résultats appellent d'avantage d'intégration des facteurs macroéconomiques, démographiques, d'équité et de mode de vie dans les analyses.

Table 1 Combinations of future challenges to adaptation and mitigation in our five SSP spaces as identified by the scenario discovery analysis described in the text

	Equity (2 options)	Conver- gence (3 options)	Energy sobriety (2 options)	Availability of low C technologies (2 options)	Availability of fossil fuels (2 options)	Population (3 options)	Capital markets (2 options)	Coverage/ Density
SSP1 (15% of cases)	improved	<i>Medium or fast</i>	high			Medium or low		70% / 65%
SSP2 (10% of cases)	improved	Medium or slow	low			<i>low</i>		45% / 40%
SSP3 (14% of cases)	worsen		low	<i>low</i>		High or medium		80% / 65%
SSP4 (8% of cases)	worsen	slow	high			<i>Medium or low</i>		90% / 90%
SSP5 (7% of cases)	improved	fast	low				Reduced imbalances	50% / 75%

Black/grey italics text indicates more/less important drivers. Coverage and density (rounded) measure the explanatory power of the drivers for each SSP

Tableau 3 : Combinaisons de facteurs incertains caractérisant les scénarios localisés dans chacun des domaines SSP1 à SSP5¹⁹. (Rozenberg et al., 2014).

Toutefois, si le choix d'un petit nombre de scénarios est justifié pour un certain nombre d'usages, tels que la coordination de recherches autour de ces « marqueurs » ou la communication de résultats, il exclut une analyse plus riche de la diversité des scénarios socio-économiques. Or, cette question de la diversité est précisément au cœur de la logique de l'architecture des nouveaux scénarios pour la recherche sur le climat. Une des principales innovations de cette nouvelle génération de scénarios est en effet de relâcher le couplage entre scénario socio-économique et scénario d'émissions de GES. L'idée clé est que chaque trajectoire d'émission (ou de concentration en l'occurrence, les RCP) n'est pas associé avec un unique scénario socio-économique, mais qu'au contraire il peut résulter de différentes combinaisons de développements économiques, technologiques, démographiques, politiques et institutionnels futurs. La nouvelle architecture des scénarios RCP-SSP ouvre la possibilité d'identifier différents futurs technologiques, économiques et politiques alternatifs qui peuvent conduire à une même trajectoire de concentration de GES. Cette architecture offre l'opportunité de dépasser une des principales difficultés dans les exercices de scénarisation: *“The more detail that one adds to the story line of a scenario, the more probable it will appear to most people, and the greater the difficulty they likely will have in imagining other, equally or more likely, ways in which the same outcome could be reached.”* (Morgan et Keith, 2008). Si les premiers développements dans le cadre de cette nouvelle architecture de scénarios se sont concentrés sur la construction de cinq scénarios « marqueurs », ou canoniques, des SSP (O'Neill et al., 2015), il devient possible et utile d'explorer la diversité des facteurs socio-économiques conduisant à certains types de résultats, par exemple conduisant à des émissions mondiales particulièrement élevées ou faibles.

Ma seconde contribution méthodologique, avec Julie Rozenberg et Vanessa Schweizer, vise à contribuer à cette exploration de la diversité des scénarios socio-économique. Elle réside dans l'amélioration d'un des algorithmes de « scenario discovery » pour qu'il trouve plusieurs combinaisons de facteurs aussi diverses que possible conduisant toutes aux mêmes types de résultats (Guivarch et al., 2016). Cette amélioration consiste en une itération de l'algorithme de « scenario discovery » PRIM (Friedmann et Fisher, 1999) (Figure 16). A chaque étape de l'itération, la combinaison de facteurs avec la plus grande densité (La densité est la fraction des scénarios caractérisés par la combinaison de facteurs considérée qui sont dans le domaine de l'espace des résultats dit « d'intérêt », c'est-à-dire le domaine que l'on cherche à caractériser.) est retenue. Nous appelons cette combinaison une « famille » de scénarios. A l'itération suivante, les scénarios identifiés sont gardés dans la base de données de scénarios, mais enlevés du sous-ensemble d'intérêt que l'on cherche à caractériser. L'analyse de « scenario discovery » est de nouveau appliquée, aux membres restants du sous-ensemble d'intérêt. L'itération s'arrête lorsque l'analyse de « scenario discovery » ne trouve plus de combinaison de facteurs avec une densité supérieure à 50%, i.e. quand les scénarios caractérisés par la combinaison de facteurs sont plus en dehors du sous-ensemble d'intérêt que dedans. Cette mise en œuvre de l'algorithme est différente de l'implémentation usuelle, dans laquelle les scénarios identifiés à chaque étape sont enlevés de la base de données. Les garder dans la base de données, tout en les enlevant du sous-ensemble d'intérêt, force l'algorithme à trouver des combinaisons diverses, car à chaque itération la condition « ne pas être dans les combinaisons identifiées précédemment » s'ajoute. Cette mise en œuvre modifiée, lorsque plus d'une itération est faite, permet d'identifier plusieurs combinaisons de facteurs, ou « familles » de scénarios, qui conduisent à des résultats similaires. L'analyse et la comparaison de ces différentes familles informent sur la diversité des scénarios caractérisés par un même résultat spécifique. Une illustration sera donnée dans la section suivante.

¹⁹ Le tableau donne les mesures de couverture et de densité des combinaisons de facteurs identifiées. La couverture est la fraction des scénarios dans le domaine d'intérêt qui comportent la combinaison de facteurs identifiée. La densité est la fraction des scénarios comportant cette combinaison de facteurs qui est dans le domaine d'intérêt.

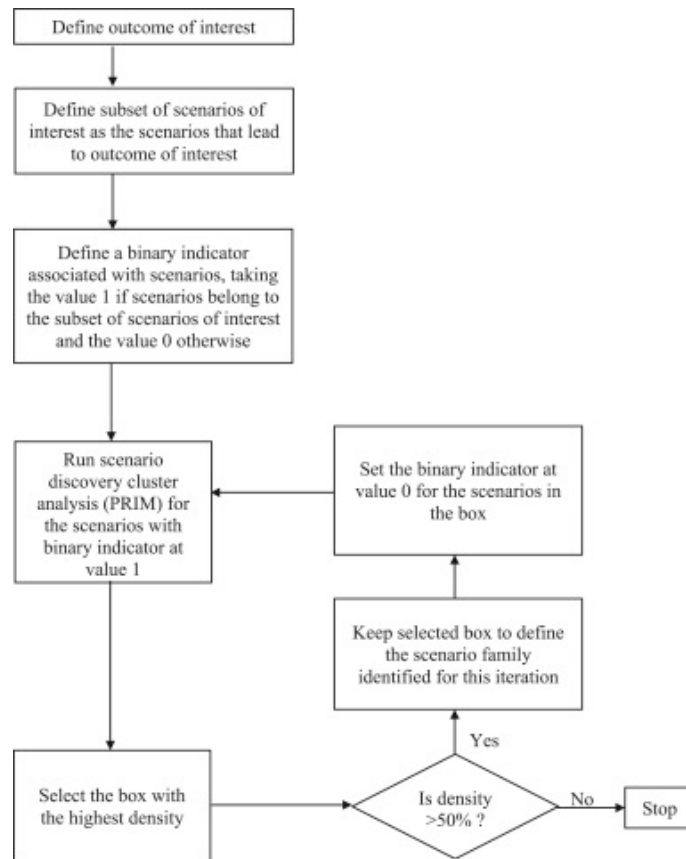


Figure 16: Iteration of scenario discovery cluster analysis to uncover the diversity of combinations of scenario drivers leading to scenario outcomes of interest. (Guivarch et al., 2016).

Il faut néanmoins reconnaître que les méthodes exposées ci-dessus ne nous affranchissent pas du caractère arbitraire des choix des groupes de paramètres, et n'épuisent pas la totalité de l'incertitude. Bien qu'un large ensemble de scénarios soit construit, il ne couvre qu'une portion de l'espace des incertitudes, et les résultats sont conditionnels à la structure du modèle utilisé et aux choix de groupes de paramètres et de leurs valeurs alternatives considérées. Il est évident que l'importance d'un facteur incertain sur les résultats dépend des hypothèses numériques correspondant à chacun des états de ce facteur considérés. De plus regrouper des paramètres en quelques ensembles de paramètres exclut l'exploration de combinaison "inhabituelles", c'est-à-dire qu'au sein d'un ensemble de paramètres, nous faisons l'hypothèse que les valeurs des paramètres co-varient et d'autres combinaisons des valeurs des paramètres ne sont pas considérées. Le choix de regrouper des paramètres résulte de deux raisons : (i) l'interprétabilité des résultats qui nécessite un nombre limité de facteurs incertains, (ii) le temps de calcul qui limite le nombre de runs du modèle possibles.

Dès lors, les choix des groupes de paramètres considérés pourraient/devraient être informés par une analyse de sensibilité des résultats du modèle préalable. Cela pose la question des méthodes d'analyse de sensibilité pour un modèle ayant de nombreux paramètres. D'un côté la méthode de Monte Carlo soulève le problème de la dimensionnalité, et devient trop coûteuse pour un modèle ayant un grand nombre de paramètres ; de l'autre la méthode « one-at-a-time », qui fait varier les paramètres un par un autour d'un point moyen a un caractère purement local et ne permet pas d'analyser les potentielles interactions entre paramètres. Pour dépasser les limites de ces deux méthodes usuelles, il existe des méthodes d'analyse de sensibilité globale (Saltelli et al., 2008), i.e. prenant en compte les interactions entre paramètres, au coût calculatoire modéré. Avec Frédéric Branger, Louis-Gaëtan Giraudet et Philippe Quirion, nous avons appliqué une telle méthode, la méthode de Morris (Morris, 1991 ; Campolongo et al., 2007) au module résidentiel d'Imacim-R-France, Res-IRF. Je ne détaille pas la méthode ou les résultats ici, mais le lecteur intéressé peut se référer à Branger et al. (2015).

4.2. Modèles, scénarios et incertitudes : résultats pour l'analyse des trajectoires d'émissions et des politiques d'atténuation

Les trois exemples ci-dessous résultent de l'exploitation d'un ensemble de scénarios construits selon la méthodologie présentée dans la section précédente en utilisant le modèle Imacsim-R monde, mais avec quelques variantes sur la version du modèle utilisé, et les groupes de paramètres incertains considérés (Tableau 4). Les analyses présentées dans les deux premiers exemples reposent sur l'utilisation d'un algorithme de « scenario discovery », et en particulier de son amélioration pour traiter la question de la diversité dans le premier exemple. Les analyses présentées dans le troisième exemple reposent sur une analyse statistique standard de l'ensemble des scénarios.

	Premier exemple	Deuxième exemple	Troisième exemple
Croissance de la productivité du pays leader	3 alternatives	3 alternatives	
Rapidité de rattrapage de la productivité	3 alternatives	3 alternatives	
Réserves de charbon et fossiles non-conventionnels	2 alternatives	2 alternatives	
Marchés du pétrole et du gaz			3 alternatives
Stratégie de l'OPEP			2 alternatives
Marché du charbon			2 alternatives
Offre de carburants liquides alternatifs			2 alternatives
Comportements de demande d'énergie	2 alternatives	2 alternatives	2 alternatives
Efficacité énergétique	3 alternatives	3 alternatives	
Disponibilité des technologies bas-carbone	2 alternatives	2 alternatives	4 alternatives
Rigidités des marchés du travail	2 alternatives		
Politiques climatiques		3 alternatives	3 alternatives
Nombre de scénarios dans l'ensemble	432	648	576

Tableau 4 : Groupes de paramètres et alternatives considérées dans les ensembles analysés dans les trois exemples donnés ci-dessous.

Les groupes de paramètres incertains considérés regroupent les paramètres suivants :

- croissance de la productivité du pays leader : trajectoires de croissance annuelle de la productivité du travail aux Etats-Unis ;
- rapidité de rattrapage de la productivité : vitesse de rattrapage de la productivité du travail dans les autres régions du monde par rapport à celle du pays leader ;
- réserves de charbon et fossiles non-conventionnels : quantités de réserves de charbon et de pétrole et gaz non-conventionnels dans chaque région du monde, paramètres de la fonction de réaction des prix de production du charbon aux variations de production, paramètres d'évolution des coûts de carburants liquides de synthèse issus du charbon ;
- marchés du pétrole et du gaz : réserves de pétrole et gaz dans chaque région du monde, paramètres des contraintes d'extraction ;
- stratégie de l'OPEP : fonction de prix visée par l'OPEP lorsqu'il n'est pas contraint par la déplétion de ses ressources ;
- marché du charbon : quantités de réserves de charbon dans chaque région du monde, paramètres de la fonction de réaction des prix de production du charbon aux variations de production ;
- offre de carburants liquides alternatifs : paramètres des fonctions d'offre d'agroc carburants dans les différentes régions du monde, paramètres d'évolution des coûts de carburants liquides de synthèse issus du charbon ;
- comportements de demande d'énergie : paramètres représentant l'évolution des modes de vie, tels que l'évolution des taux de motorisation avec l'augmentation des revenus, l'évolution des surfaces résidentielles, l'évolution des consommations de biens industriels, l'évolution des formes des villes ;
- efficacité énergétique : paramètres de la fonction représentation l'évolution de l'efficacité énergétique induite par les prix de l'énergie dans les secteurs de l'industrie, des services et de l'agriculture ;
- disponibilité des technologies bas-carbone : vitesse de l'apprentissage (réduction des coûts) et potentiels maximums des technologies bas-carbone (renouvelables, nouvelle génération de nucléaire, capture et séquestration du carbone, véhicules électriques...) ;

- rigidité du travail : élasticité de la courbe salaire-chômage ;
- politiques climatiques : trajectoire d'émissions de CO₂ visée, et utilisation des revenus des taxes carbone.

Le détail exact de ces paramètres est donné dans les annexes ou suppléments des articles en question.

Premier exemple : Diversité socio-économique de scénarios à hautes émissions²⁰

Nous avons appliqué notre méthodologie pour mettre en évidence la diversité de scénarios socioéconomiques au cas des scénarios ayant des émissions cumulées de CO₂ élevées (Guivarch et al., 2016). Bien que l'Accord de Paris ait entériné l'objectif de contenir l'élévation de la température moyenne de la planète nettement en dessous de 2°C par rapport aux niveaux préindustriels, la croissance continue des émissions de GES en font un objectif de plus en plus difficile à atteindre (Guivarch et Hallegatte, 2013) et, si cette croissance se poursuit, le monde risque d'atteindre 3 °C ou 4 °C d'ici la fin du siècle. Face à ce risque, certaines études ont évalué les impacts du changement climatique pour des augmentations de température élevées (par exemple New et al., 2011). Mais les dommages dus au changement climatique et les capacités d'adaptation vont également dépendre des mondes socio-économiques futurs. Il est donc important d'explorer à quoi pourrait ressembler en termes socio-économiques un monde où les émissions seraient élevées. Il existe quelques archétypes de scénarios aux émissions élevées, en particulier le scénario RCP 8.5 (Riahi et al., 2011) et les SRES A2 et A1F (Nakicenovic et al., 2000), mais ils restent peu nombreux (IPCC, 2014, chapitre 6) et la diversité des conditions socio-économiques qui pourraient conduire à des émissions élevées n'a pas été étudiée de façon systématique. Notre exemple ici est la première étude de ce type.

Dans la base de scénarios construite, nous nous intéressons à ceux qui conduisent à des émissions cumulées de CO₂ depuis l'ère pré-industrielle supérieure à 2400 GtC. Ce seuil correspond aux émissions cumulées du scénario RCP 8.5, pour lequel l'augmentation de température globale, par rapport à la moyenne de 1850-1900, dépasserait probablement les 4°C d'ici la fin du 21^{ème} siècle (IPCC, 2013). Ce sous-ensemble représente 15% des scénarios dans notre ensemble de scénarios (Figure 17).

L'itération de l'algorithme de "scenario discovery", telle que décrite plus haut, met en évidence quatre familles de scénarios, ou combinaisons de facteurs incertains (Tableau 5). Ces quatre familles ont deux facteurs en commun : une disponibilité élevée du charbon et des fossiles non conventionnels et des comportements de consommation intensifs en énergie. Si la disponibilité du charbon et des fossiles non conventionnels est plus faible, les prix des énergies fossiles augmentent, relativement au cas où la disponibilité est élevée, et induisent une amélioration de l'efficacité énergétique et des substitutions plus rapidement ce qui conduit à des émissions moindres. Dans le cas où les comportements de consommation sont sobres en énergie, la demande énergétique augmente moins vite d'où des émissions moindre également, et ce même si les ressources fossiles sont potentiellement largement disponibles.

Mais les quatre familles diffèrent pour ce qui est des autres facteurs, en particulier la croissance de la productivité du leader et la vitesse de rattrapage. Une famille (n°3) est caractérisée par une croissance de la productivité rapide dans toutes les régions, combinée avec une disponibilité élevée du charbon et des fossiles non conventionnels et des comportements de consommation intensifs en énergie. Une autre famille de scénarios (n°1) a la même combinaison de facteurs sauf pour la vitesse de rattrapage de la productivité, qui est faible ou moyenne. Dans cette famille, le PIB par habitant croît rapidement

²⁰ Il serait également intéressant d'analyser la diversité socio-économique de scénarios à faibles émissions, notamment pour contribuer à la littérature et aux débats sur les liens entre croissance et émissions, et en particulier sur l'opposition entre deux visions, celle de la croissance verte vs. celle de la décroissance comme nécessité face à l'enjeux climatique (voir par exemple van den Bergh, 2011). Bien que cela ne sera pas repris dans la partie Perspective de Recherches de ce dossier, cela fait partie de la liste de mes travaux futurs possibles et plausibles.

dans les pays riches, mais plus lentement dans les autres régions. Les émissions sont globalement élevées, en partie du fait d'émissions élevées dans les pays riches et en partie car le rattrapage plus lent est associé (par construction des hypothèses) à une croissance plus rapide de la population dans les pays pauvres, d'où des émissions aussi relativement élevées. Les deux autres familles (n°2 et 4) ont une croissance de la productivité moyenne. Les émissions sont néanmoins élevées car les technologies bas-carbone sont peu disponibles (famille n°2) ou l'efficacité énergétique est faible (famille n°4).

Les quatre familles diffèrent également par certains résultats, en particulier la croissance du PIB par habitant à l'échelle globale (axes des abscisses, Figure 17) ainsi que les inégalités de PIB par habitant entre régions. La famille 3 est caractérisée par une croissance élevée, la famille 1 par une croissance relativement élevée, et les familles 2 et 4 par une croissance relativement faible. Le fait que des résultats similaires en termes d'émissions cumulées puissent être associés à des résultats très différents en termes de PIB par habitant peut s'expliquer par deux éléments : (i) le rôle de la population comme facteur multiplicatif, (ii) le rôle des interactions entre croissance et intensité énergétique et/ou intensité carbone, qui tendent à associer une croissance plus rapide à une amélioration plus rapide de l'intensité, du fait d'un remplacement du capital et d'un changement technique plus rapides²¹.

Ces résultats mettent en évidence que des émissions élevées ne sont pas nécessairement associées à une croissance élevée du PIB par habitant, mais peuvent être associées à une croissance relativement faible du PIB par habitant, si elle est contrebalancée par une population élevée et/ou une amélioration de l'intensité énergétique lente. Ces résultats ont des implications pour les capacités de financement des actions d'atténuation, ainsi que pour la vulnérabilité et l'adaptation au changement climatique. Un monde de hautes émissions avec une croissance faible du PIB par habitant pose des défis autrement plus grands pour le financement de l'atténuation et de l'adaptation qu'un monde où la croissance serait rapide. Ceci est à mettre en regard de la « conjecture de Schelling » (Schelling, 1992) qui postule que l'augmentation des revenus diminue les impacts négatifs du changement climatique, conjecture confirmée depuis par Anthoff et Tol (2014) pour les pays les moins riches. De plus, un monde plus inégalitaire entre régions amplifierait la question d'équité posée par la distribution des impacts du changement climatique pesant d'avantage sur les régions et ménages les plus pauvres (Anthoff et al., 2009 ; Anthoff et Tol, 2010 ; Dennig et al., 2015).

²¹ On peut noter que ce résultat peut sembler contraire aux observations historiques et aux conclusions de la littérature sur le (dé)-couplage croissance-émissions qui montrent que les phases de croissance les plus rapides ont en général été associées à une croissance rapide des émissions, car elles correspondaient à des phases d'industrialisation des pays (voir Blanco et al., 2014, pour une synthèse). Néanmoins ces observations historiques, à l'échelle des pays, ne vont pas nécessairement se reproduire, à l'échelle mondiale, dans le futur ; et les liens entre émissions et croissance futurs dépendront des « moteurs » de la croissance, centrés sur l'augmentation de la productivité ou l'accumulation de capital, le premier cas conduisant à un « couplage » moins fort que le second entre croissance et émissions (Jakob et al., 2012). Or, les variantes sur la croissance que nous étudions dans notre exemple, sont des variantes sur les vitesses de croissance de la productivité du travail ; d'où une croissance plus rapide associée à un moindre « couplage » avec les émissions.

	PRIM clusters	1	2	3	4	Four clusters together
High cumulative emissions scenarios	density	100%	67%	92%	58% (92%)	89%
	coverage	42%	24% (14%)	44% (19%)	50% (19%)	88%
leader productivity growth	low					
	medium					
	fast					
productivity catch-up	low					
	medium					
	fast					
coal and unconventional fossil fuels availability	low					
	high					
energy demand behaviors	energy-frugal					
	energy-intensive					
energy efficiency	low					
	mixed					
	high					
availability of low-carbon technologies	low					
	high					
rigidities in labor markets	low					
	high					

Tableau 5 : Families of scenarios uncovered by the scenario discovery analysis. The grey boxes represent the combinations of parameters values corresponding to each family of scenarios identified. Density and coverage results are reported to the remaining scenarios with binary indicator at value 1 at each time step; the values corresponding to the initial subset of scenarios of interest are given in parenthesis when different. The density and coverage scores are also given for the four clusters taken together, with respect to the initial subset of scenarios of interest. Note that the coverage of the four cluster taken together is slightly less than the sum of coverage values for each cluster, because a few (4) scenarios are in both cluster 2 and cluster 4 (which can be seen on Figure 5 as well). (Guivarch et al., 2016).

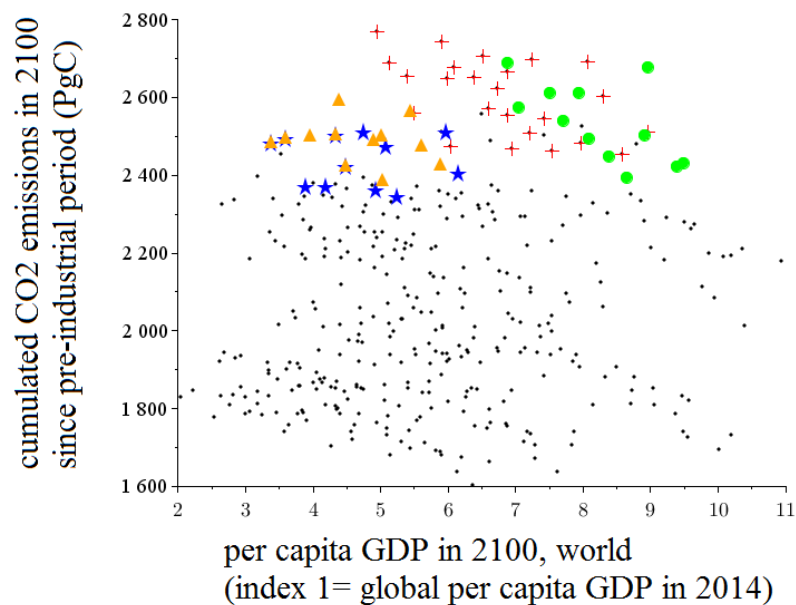


Figure 17 : The 432 scenarios plotted according to the global per capita GDP in 2100 (X-axis) and the global cumulative CO₂ emissions since the pre-industrial period (Y-axis). Families of scenarios uncovered by PRIM analysis are materialized with red crosses (family 1), blue stars (family 2), green circles (family 3) and orange triangles (family 4). (Guivarch et al., 2016).

Deuxième exemple : déterminants des coûts de l'atténuation vs. déterminants de la croissance dans les scénarios bas-carbone

Les évaluations macroéconomiques des trajectoires d'atténuation donnent comme mesure du coût de l'atténuation les pertes de bien-être, de PIB ou de consommation par rapport à une *baseline*, c'est-à-dire un scénario contrefactuel d'évolution socio-économique faisant l'hypothèse d'une absence d'effort d'atténuation mais également d'une absence de dommages dus au changement climatique (Nakicenovic et al. 2000; Moss et al. 2010; O'Neill et al. 2014). Par exemple, le dernier résumé pour décideurs du rapport du groupe 3 du GIEC (IPCC, 2014) synthétise que « *les scénarios d'atténuation qui atteignent des concentrations atmosphériques d'environ 450 ppm eqCO_2 d'ici à 2100 comportent des baisses de la consommation mondiale (hors avantages découlant de la réduction du changement climatique et co-avantages et effets secondaires indésirables²² de l'atténuation) de 1 à 4 % (médiane: 1,7 %) en 2030, 2 % à 6 % (médiane: 3,4 %) en 2050 et 3 % à 11 % (médiane: 4,8 %) en 2100 par rapport à la consommation dans les scénarios de référence qui présentent une croissance de 300 % à plus de 900 % au cours du siècle. Ces chiffres correspondent à une réduction annualisée de la croissance de la consommation de 0,04 à 0,14 (médiane: 0,06) point de pourcentage au cours du siècle à comparer à une croissance annualisée de la consommation selon la référence qui se situe entre 1,6 et 3 % par an.* ». La Figure 18 permet de mieux comprendre ces deux phrases : dans l'ensemble des scénarios de *baseline* comme d'atténuation la consommation globale croît, mais elle croît en moyenne moins vite dans les scénarios d'atténuation. Elle met en évidence également qu'il y a une incertitude importante sur la croissance, tant en *baseline* qu'avec des politiques d'atténuation. En se concentrant sur les variations de consommation par rapport à la *baseline* comme mesure du coût de l'atténuation, les analyses s'affranchissent de cette incertitude sur la croissance. Elles s'intéressent en particulier aux déterminants des coûts de l'atténuation et ont montré que la disponibilité des technologies bas-carbone jouait un rôle important pour l'amplitude de ces coûts (Kriegler et al., 2014).

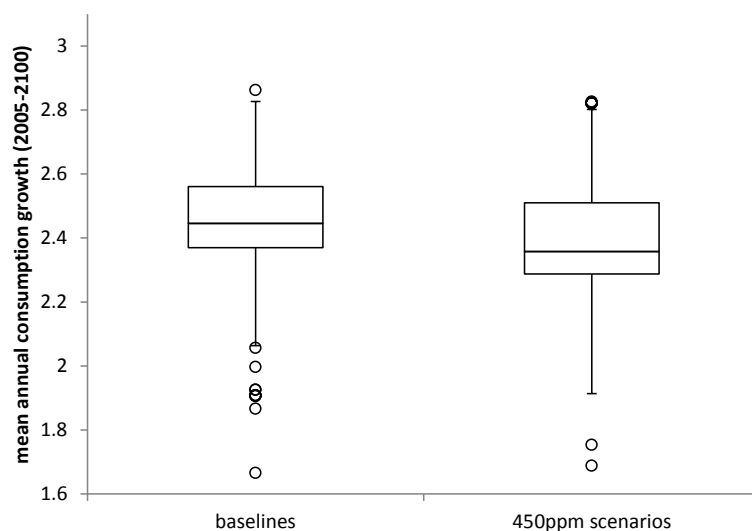


Figure 18 : Croissance annuelle moyenne de la consommation globale sur 2005-2100 dans les scénarios de *baselines* et les scénarios d'atténuation qui atteignent des concentrations atmosphériques d'environ 450 ppm eqCO_2 d'ici à 2100 dans la base de données de scénarios AR5.

A l'inverse peu d'étude ont analysé les déterminants de la croissance dans un scénario d'atténuation. Pourtant, ce type d'analyse serait nécessaire pour répondre à des questions telles que « quelle

²² Les co-avantages et effets secondaires indésirables font référence à ce que nous avons appelé co-bénéfices et co-coûts dans la section 3.3.

croissance économique est compatible avec la cible des 2°C, ou plus généralement un objectif de décarbonisation de l'économie ? », ou « quels sont les principaux déterminants d'une croissance verte ? ».

Ici, nous analysons les principaux déterminants de la croissance sous contrainte carbone, en prenant en compte les incertitudes sur de nombreux paramètres socio-économiques incluant les technologies, les comportements de demande d'énergie, la croissance de la productivité et le design des politiques climatiques. Nous comparons deux indicateurs : les niveaux de richesse (PIB par habitant) absolus atteints dans les scénarios d'atténuation et les pertes de PIB par rapport aux *baselines*. Nous montrons que si des pertes de PIB plus faibles tendent à être associées à des niveaux absolus de richesse dans les scénarios d'atténuation plus élevés, la corrélation n'est pas très forte (Figure 19). Les deux mesures seraient équivalentes, i.e. leur corrélation serait de -1, seulement si les facteurs incertains considérés n'avaient pas d'effet sur le PIB en *baseline*, et ne jouaient que sur les possibilités de réduction des émissions. Ce serait par exemple le cas si tous les facteurs incertains décrivaient des technologies qui ne sont rentables qu'en présence d'un prix du carbone, comme la capture et séquestration du carbone. Mais nos scénarios prennent en compte d'autres paramètres incertains, dont les réserves fossiles et les technologies bas-carbone qui sont déployées y compris en *baseline*, comme l'éolien ou le solaire. Il n'y a donc pas de raison que les deux mesures soient parfaitement (négativement) corrélées.

Certains facteurs augmentent le PIB en *baseline* mais n'ont que peu d'effet sur les scénarios d'atténuation. C'est le cas par exemple, de ressources fossiles largement disponibles qui conduisent à une croissance plus rapide en *baseline* mais ont un effet négligeable dans les scénarios d'atténuation car elles restent en grande partie inexploitées (McGlade et Ekins, 2005). Ainsi deux hypothèses différentes sur les ressources fossiles vont conduire à des PIB similaires dans le cas de politiques climatiques, mais des PIB différents en *baseline*, et donc des pertes de PIB différentes.

Les hypothèses de croissance de la productivité et de vitesse de convergence, mais aussi celles sur les comportements de demande d'énergie et sur l'efficacité énergétique, influent sur la croissance tant en *baseline* que dans les scénarios d'atténuation ; leur impact sur les pertes de PIB est donc moindre. Ainsi des scénarios similaires en termes de pertes de PIB par rapport à la *baseline* peuvent être associés à des niveaux de richesse absolus différents.

Les déterminants principaux des pertes de PIB et du niveau de PIB en absolu diffèrent (Figure 19).

Les pertes de PIB sont les plus importantes, en moyenne, dans les scénarios où les recettes de la fiscalité carbone sont redistribués aux ménages de façon forfaitaire (et non à travers une réduction de taxes pré-existantes) et où les technologies bas-carbone sont relativement peu disponibles. Elles sont les plus faibles lorsque les revenus carbone sont utilisés pour réduire les taxes pré-existantes et lorsque les ressources de fossiles non-conventionnels sont peu abondantes. Ces résultats sont cohérents avec la littérature, sur le « double-dividende » (Goulder, 1995 ; Bovenberg, 1999), et sur le rôle des technologies pour les coûts de l'atténuation (Kriegler et al., 2014). Nous retrouvons également un résultat que nous avons mis en évidence dans Rozenberg et al. (2010), qui montre que les politiques climatiques sont moins coûteuses dans le cas de rareté plus prononcée des ressources pétrolières (voir exemple suivant de ce document).

Le niveau de richesse absolu atteint dans les scénarios d'atténuation est, en moyenne, le plus élevé lorsque les comportements de demande sont sobres en énergie et l'efficacité énergétique est élevée. A l'inverse, il est le plus faible lorsque les comportements de demande sont intensifs en énergie et l'efficacité énergétique faible. Là encore, ces résultats sont cohérents avec des mécanismes mis en évidence dans la littérature : les économies dues à une moindre demande d'énergie peuvent être dépensées dans d'autres types de consommation, d'où une augmentation de la production dans certains

secteurs de l'économie (Thomas et Azevedo, 2013) ; une plus grande efficacité énergétique a un effet positif sur l'activité économique (Barker et al., 2009).

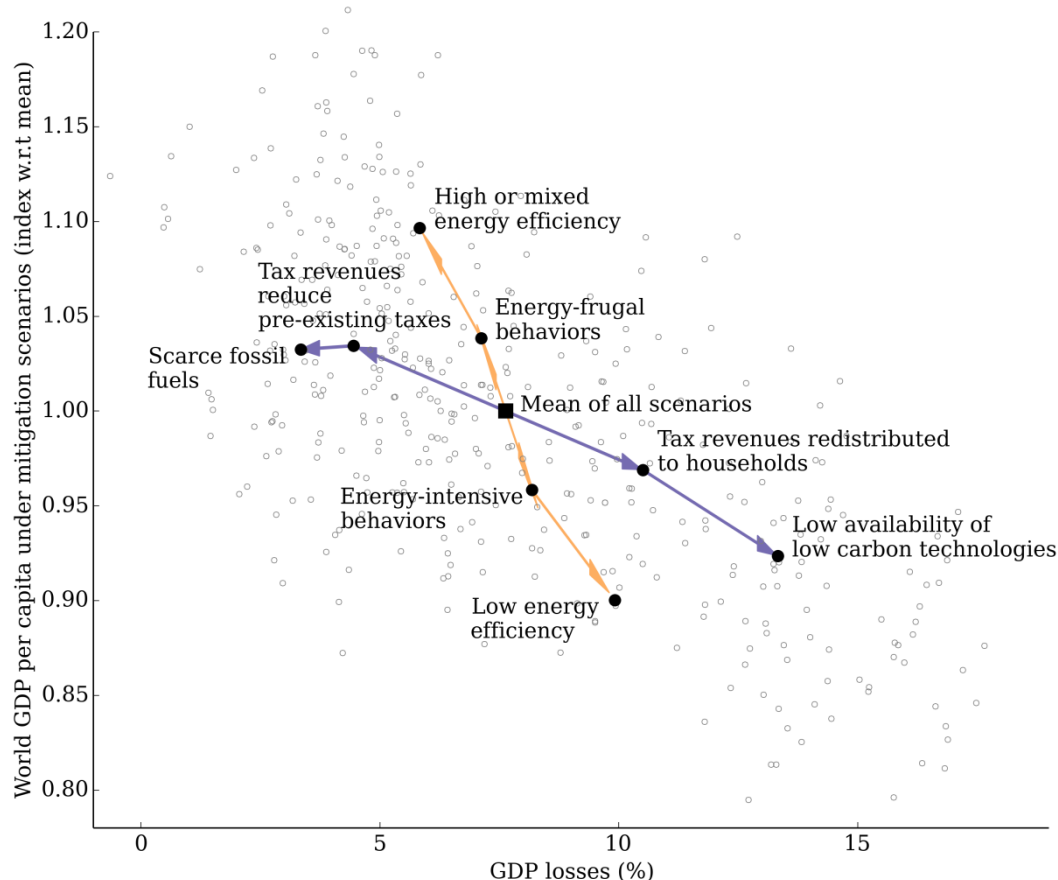


Figure 19: Each empty circle represents one mitigation scenario, plotted according to the global GDP losses compared to baseline scenarios (X-axis) and global per capita GDP (Y-axis), both over 2011-2050 and discounted with a 3% discount rate. Per capita GDP is expressed as an index with regards to the mean across all mitigation scenarios (blacksquare). The 8 black dots are the average across the subset of scenarios that share common assumptions explained by the adjacent caption. The first two discriminating drivers identified by a regression tree algorithm are represented by colored arrows, purple for the GDP losses and orange for the global per capita GDP in the mitigation scenarios. GDP losses are high if the carbon tax revenues are redistributed to households and if the availability of low-carbon technologies is low. They are low if the carbon tax revenues are used to reduce pre-existing taxes and if the availability of unconventional fossil fuels is low. Per capita GDP in mitigation scenarios is high if demand behavior is energy-frugal and if end-use energy efficiency is high. It is low if demand behavior is energy-intensive and if end-use energy efficiency is low.

La mesure pertinente pour l'évaluation des trajectoires d'atténuation dépend de la question posée: décider d'un objectif d'atténuation ou d'une stratégie pour atteindre un objectif déjà fixé. La quantification des pertes de PIB par rapport à une *baseline* sont utiles dans un cadre d'analyse coûts-bénéfices pour décider du niveau d'atténuation « optimal » à viser. Les pertes de PIB dues à l'atténuation sont alors mises en regard des bénéfices de l'atténuation, à savoir les dommages du changement climatique évités, eux-mêmes mesurés par comparaison avec la même *baseline*²³ (Nordhaus, 1992 ; Nordhaus, 2008). Cependant, l'adéquation de cette approche coûts-bénéfices pour

²³ A noter que cette précision apparemment anodine de **même baseline** ne l'est pas. Dans les faits, les analyses des coûts de l'atténuation (synthétisées dans le chapitre 6 du volume sur l'atténuation du 5^{ème} rapport d'évaluation du GIEC) et celles sur les coûts des dommages (synthétisées dans le chapitre 10 du volume sur les impacts, l'adaptation et la vulnérabilité) prennent rarement une même baseline. L'un des enjeux de la nouvelle architecture de scénarios pour la recherche sur le climat est d'éviter ce décalage.

la question climat est mise en doute depuis longtemps (pour des références récentes voir Ackerman et al., 2009 ; Koomey, 2013), notamment car les estimations des dommages sont très incertaines et potentiellement de l'ordre de « l'inconnaissable » (Dietz, 2012; Pindyck, 2013).

Malgré – ou plutôt à cause de (Weitzman, 2012) – l'incertitude sur les dommages futurs du changement climatique, les décideurs du monde entier ont fixé des objectifs d'atténuation en termes d'augmentation de la température (à l'échelle globale), ou de niveau d'émission à une date future (aux échelles globales, nationales et locales). Par exemple, l'Accord de Paris formalise les objectifs globaux de « contenir l'élévation de la température moyenne de la planète nettement en dessous de 2°C », « parvenir au plafonnement mondial des émissions de gaz à effet de serre dans les meilleurs délais » et « parvenir à un équilibre entre les émissions anthropiques par les sources et les absorptions anthropiques par les puits de gaz à effet de serre au cours de la deuxième moitié du siècle ». L'Accord fait également des « contributions déterminées au niveau national », souvent exprimées comme une réduction d'émission, ou d'intensité carbone du PIB, à l'horizon 2030, la pierre angulaire des actions d'atténuation. Pour évaluer les stratégies pour atteindre ces objectifs, une mesure absolue, et non plus relative à une *baseline*, de leur performance est nécessaire, par exemple le PIB dans les trajectoires qui respectent ces objectifs – tout en reconnaissant que le PIB ou la consommation peuvent être une mauvaise mesure du bien-être²⁴ (Stiglitz et al. 2010; Fleurbaey 2009).

Nos résultats montrent que les principaux facteurs incertains déterminant la croissance sous contrainte carbone peuvent être différents de ceux qui déterminent les pertes de PIB par rapport à une *baseline*. Finalement, le passage par une *baseline* comme outil de rigueur analytique pour décomposer le problème du changement climatique en coût de l'atténuation d'un côté et bénéfices de l'autre empêche de penser les interactions entre développement et atténuation, dans la mesure où l'analyse des différences par rapport à ce scénario contrefactuel n'est pas suffisante pour comprendre les déterminants de la croissance sous contrainte carbone. Analyser ces déterminants, et comprendre les interactions²⁵ entre les déterminants « conventionnels » de la croissance, comme la productivité du travail, et des déterminants liés aux systèmes énergétiques, tels que l'efficacité énergétique, peut contribuer à réconcilier l'atténuation du changement climatique avec l'agenda plus large du développement. En effet l'atténuation du changement climatique n'est pas une modification marginale le long d'un scénario « business-as-usual ». Il s'agit d'une transformation majeure des systèmes techniques et socio-économiques. Penser cette transformation nécessite d'intégrer l'ensemble des aspects de la croissance et du développement dans le même cadre.

Troisième exemple: Valeur d'assurance de l'atténuation face à l'incertitude sur la rareté des ressources pétrolières

Mon troisième exemple est tiré de Rozenberg et al. (2010). Dans cet article, nous utilisons le modèle Imacim-R monde pour évaluer dans un cadre commun à la fois les coûts des politiques d'atténuation et les coûts de la rareté des ressources pétrolières, à l'échelle mondiale. Nous montrons que les deux coûts sont du même ordre de grandeur, pour les hypothèses testées ; et que, dans un contexte de ressources pétrolières limitées mais incertaines, les politiques climatiques réduisent la vulnérabilité de l'économie mondiale à l'épuisement des ressources pétrolières

²⁴ Ceci pose la question des indicateurs alternatifs au PIB qui peuvent être analysés à partir de scénarios produits par des modèles tels qu'Imacim-R. Nous explorerons cette question dans des travaux futurs, en particulier ceux qui porteront sur l'évaluation de l'architecture internationale climatique (voir section 2 des Perspectives de Recherche).

²⁵ Comprendre ces interactions passe en particulier par la compréhension de la nature du progrès technique, et la possibilité de le « diriger », tel que modélisé par exemple dans Acemoglu et al. (2012).

Nous utilisons, comme dans les exemples précédents, une base de données de scénarios (comportant 576 scénarios) construite en faisant varier les paramètres représentant les hypothèses sur la croissance, les styles de développement, les ressources fossiles, et les technologies. Les deux groupes de paramètres principaux pour l'étude sont ceux représentant :

- les marchés pétroliers et gaziers. Ils regroupent les hypothèses sur (i) le montant des ressources, (ii) les comportements de l'OPEP dans la stratégie de prix visés, (iii) les inerties dans le développement de la production de pétroles non-conventionnels. Trois alternatives sont construites pour représenter des ressources abondantes et facilement exploitables (hypothèse 1), des ressources très contraintes (hypothèse 3) ou une situation intermédiaire (hypothèse 2). Dans l'hypothèse 1, la production de pétrole peut atteindre 115 Mb/jour ; dans l'hypothèse 3, elle atteint un pic sous les 95 Mb/jour puis décroît ; dans l'hypothèse intermédiaire, la production croît jusqu'à un plateau de 95 Mb/jour environ avant de décroître à la fin du siècle. Ces chiffres sont à comparer à la production de 2014 qui s'élevait à 88,7 Mb/jour.

- la mise en œuvre de politiques climatiques. Deux cas polaires sont considérés : (i) un scénario « business-as-usual » (BAU) sans contrainte sur les émissions de GES, et (ii) un scénario de politique climatique globale visant à stabiliser la concentration de CO₂ dans l'atmosphère à 450 ppm.

Pour l'analyse nous supposons une équiprobabilité de toutes les hypothèses alternatives portant sur les autres groupes en dehors des deux spécifiés ci-dessus.

Nous mesurons les coûts de la rareté des ressources pétrolières et des politiques climatiques avec la même mesure, à savoir la somme du produit mondial brut (PMB) sur la période 2010-2050, actualisée avec un taux d'escompte de 3%. Les coûts sont mesurés par la différence (en pourcentage) de sommes actualisées de PMB entre deux scénarios, par exemple avec ou sans politiques climatiques, toutes choses égales par ailleurs, ou avec plus ou moins de rareté des ressources pétrolières. Nous trouvons que les deux types de coûts sont du même ordre de grandeur, de quelques pourcents du PMB actualisé (Tableau 6).

Par ailleurs, nous mettons en évidence l'interaction entre politiques climatiques et rareté des ressources pétrolières : les pertes de PMB dues à la combinaison de politiques climatiques avec des ressources pétrolières très contraintes (par rapport à la situation de référence sans politiques climatiques et des ressources abondantes) sont plus faibles que la somme des deux effets pris séparément. Le coût des politiques climatiques est en effet corrélé avec l'hypothèse sur les ressources fossiles²⁶ : avec des ressources abondantes (hypothèse 1) le coût est plus élevé (1.7% en moyenne) que dans le cas de ressources contraintes (0.7% en moyenne pour l'hypothèse 3). Les politiques climatiques sont moins coûteuses dans un cas de contrainte sur les ressources pétrolières car, en plus de leur bénéfice en termes de dommages du changement climatique évités, elles apportent un co-bénéfice en termes de résilience à la rareté du pétrole. Ces co-bénéfices sont illustrés dans la Figure 20, qui représente les histogrammes des pertes de PMB dues à la rareté pétrolière pour les scénarios sans politiques climatiques (BAU) ou avec politiques climatiques (450ppm). L'histogramme 450ppm est décalé vers la gauche, ce qui indique que les pertes moyennes dues à la rareté du pétrole sont réduites par les politiques climatiques. De plus la queue de distribution de coûts élevés dans le cas BAU disparaît dans le cas 450ppm, ce qui montre que les politiques climatiques évitent le risque de pertes élevées (définies comme les pertes de plus de 3%).

Ces co-bénéfices des politiques climatiques viennent du fait qu'elles engendrent des augmentations plus précoces et plus graduelles du prix à la consommation des produits pétroliers. Dans un monde de second-rang, où les anticipations sont imparfaites (voir par exemple Guesnerie, 1992), les augmentations brutales de prix conduisent à des pertes de bien-être plus importantes que des augmentations plus graduelles (Nordhaus, 2007). L'augmentation plus régulière des prix de l'énergie

²⁶ Il faut noter que ce résultat est dû au type de politiques climatiques représentées, qui sont du type « quantité » (une trajectoire d'émissions à respecter) et non du type « prix » (par exemple, une trajectoire de prix du carbone imposée). Nous pourrions étudier, dans des travaux futurs, si cette interaction avec les marchés des énergies fossiles est de nature à modifier les résultats sur la supériorité des instruments prix par rapport aux instruments quantités en matière de climat (Pizer, 2001).

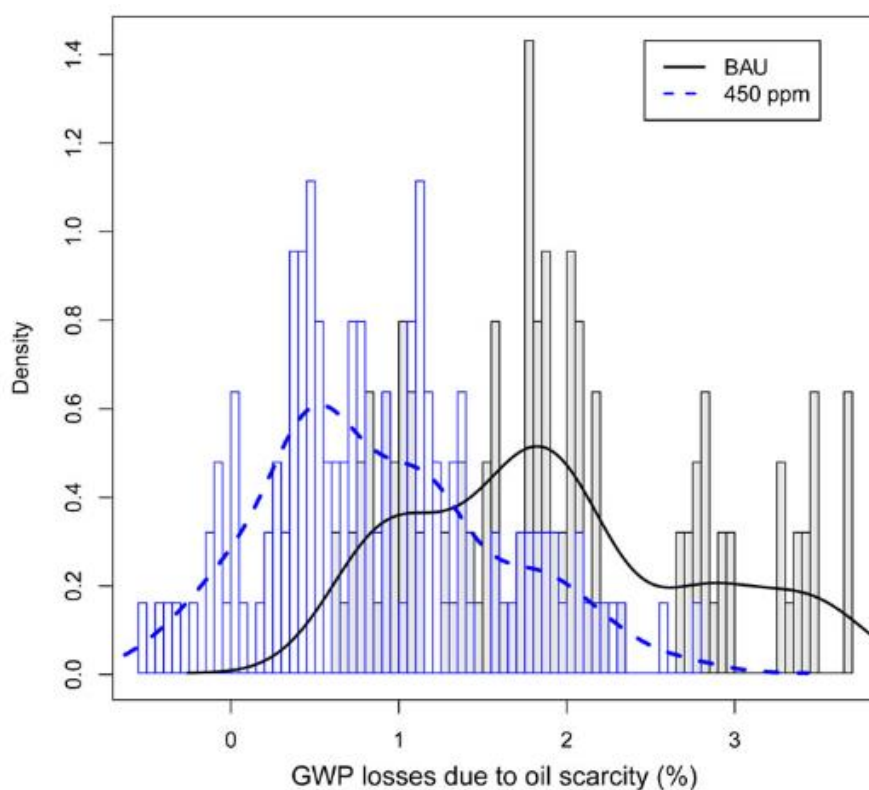
évite un *lock-in* dans des modes de production et de consommation dépendant au pétrole, et encourage le développement (changement technique induit) et la diffusion (incitation à l'investissement) de technologies plus efficaces ou substituant le pétrole avant la phase de déplétion de la production pétrolière, et donc d'augmentation rapide des prix.

Ainsi les politiques climatiques peuvent être considérées comme une assurance contre les effets potentiellement négatifs de la rareté des ressources pétrolières sur l'économie mondiale. Cette assurance est à mettre en parallèle avec l'assurance contre les dommages du changement climatique et contre l'incertitude sur la sensibilité climatique et les dommages eux-mêmes que représentent les politiques climatiques précoces (Manne et Richels, 1992 ; Yohe et al. 2004).

Table 1 Changes in the 3%-discounted GWP over the 2010–2050 period (**mean** [min ; max]) caused by fossil fuels constraints and climate policies

	Assumption 1: oil and gas largely available	Assumption 2: oil and gas limited	Assumption 3: oil and gas very constrained
BAU	Reference case	–1.3% [–0.6 ; –2.1]	–2.6% [–1.8 ; –3.7]
450 ppm	–1.7% [–0.4 ; –4.4]	–2.3% [–1.0 ; –4.8]	–3.3% [–2.0 ; –5.7]
Net cost of climate policies	1.7% [0.4 ; 4.4]	1.0% [0.0 ; 3.1]	0.7% [0.0 ; 2.7]

Tableau 6: Variation de PMB dues aux contraintes sur les ressources fossiles ou aux politiques climatiques. (Rozenberg et al., 2010).



Histogram and smoothed densities of GWP losses (in %) due to constrained oil supply (discounted GWP between 2010 and 2050, with a 3% discount rate). *Black filled bars and plain line* for BAU scenarios; *blue empty bars and dashed line* for 450 ppm-stabilization scenarios. The 450 ppm histogram is shifted to the left compared with the BAU one, indicating that losses from oil scarcity are larger in absence of climate policies

Figure 20 : Histogrammes des pertes de PMB dues à la rareté pétrolière pour les scénarios sans politiques climatiques (BAU) ou avec politiques climatiques (450ppm). (Rozenberg et al., 2010).

Au-delà des trois exemples présentés ici, j'ai contribué à d'autres analyses s'appuyant sur la construction et l'analyse d'ensemble de scénarios :

- Deux analyses multi-critères de la sécurité énergétique : Guivarch et al. (2015) (présenté dans la section 3.3) où nous montrons que les politiques climatiques n'améliorent pas l'ensemble des dimensions de la sécurité énergétique, et Guivarch et Monjon (2016) où nous identifions les principaux facteurs incertains qui déterminent chacune des dimensions de la sécurité énergétique dans un monde bas-carbone ;
- Demailly et al. (2013) où nous analysons en quoi les problématiques énergétiques et climatiques renforcent l'incertitude sur la croissance future ;
- Guivarch et al. (2014) où nous analysons les trajectoires temporelles émergeant dans un ensemble de scénarios, et étudions les points de passage à court-terme des trajectoires conduisant à long-terme à des « futurs désirables ».

J'ai également contribué à la réflexion sur les perspectives ouvertes par les innovations méthodologiques s'appuyant sur des ensembles de scénarios pour la démarche prospective (Guivarch et Rozenberg, 2014). Cette approche donne des éclairages nouveaux pour la décision :

- (i) l'évaluation de la robustesse des résultats et mécanismes mis en lumière,
- (ii) l'identification de « comportements » émergents dans un ensemble de scénarios qui permet d'extraire des informations plus riches pour la décision, telles que les conditions de compromis ou synergies entre plusieurs critères dans une décision multicritères, ou une analyse dynamique pour relier les dynamiques de court-terme avec les développements à plus long-terme,
- (iii) la sélection d'un petit nombre de scénarios « pertinents » pour une étude détaillée. L'originalité de cette approche est aussi d'inverser les rôles habituels dans l'articulation entre qualitatif et quantitatif : le quantitatif devient exploratoire, pour tirer des enseignements qualitatifs de l'exploration systématique de grands ensembles de trajectoires quantifiées.

Par ailleurs, j'ai participé à la création d'un lieu d'échange autour de ces méthodologies et de leurs applications à travers un workshop co-organisé avec Evelina Trutnevyte et Robert Lempert, qui a débouché sur un essai sur la prise en compte de l'incertitude dans les scénarios (Trutnevyte et al., 2016) ainsi que la coordination d'un numéro spécial d'Environmental Modelling & Software sur le sujet (<http://www.sciencedirect.com/science/journal/13648152/vsi/10TGFMQJTVC>) .

Dans mes perspectives de recherche, je vais m'intéresser aux cadres de décision en incertitude (radicale) et à la façon dont les ensembles de scénarios peuvent permettre d'informer ces cadres.

III. Perspectives de recherche

Mes perspectives de recherche s'articulent autour de deux grands axes, que je développe ci-dessous.

1. Vers une évaluation (plus) intégrée prenant (mieux) en compte les incertitudes pour informer la décision

Dans l'introduction de la section 4 du bilan de mes travaux, j'ai présenté le changement climatique comme une situation relevant par de nombreux aspects de l'incertitude knightienne, ce qui représente un défi pour la décision, et pour la modélisation qui vise à fournir des éclairages à la prise de décision. Jusqu'ici je n'ai traité que du second défi, à savoir la prise en compte de l'incertitude (radicale) dans les études modélisées, et en me limitant à la modélisation de l'atténuation. Je vais maintenant m'intéresser (i) aux cadres de décision en incertitude (radicale) et à la façon dont les ensembles de scénarios peuvent permettre d'informer ces cadres, et (ii) à la représentation des dommages du changement climatique afin de pouvoir intégrer atténuation et dommages dans un même cadre et éviter les difficultés liées à l'utilisation d'une *baseline* sans dommages que j'ai abordées dans la section 4 du bilan.

1.1. Informer des cadres de décision alternatifs à l'utilité espérée

Le cadre qui a été le plus largement utilisé jusqu'ici pour traiter du climat comme problème de décision sous incertitude est celui de l'utilité espérée. L'incertitude y est représentée par une distribution de probabilités (subjective) des éléments incertains, notamment les dommages. Par exemple Weitzman, (2011), Nordhaus (2011) et Pindyck (2011) examinent les questions posées par la « *fat-tail* » de la probabilité des dommages.

Mais ce cadre nécessite d'être capable de donner une distribution de probabilités, éventuellement subjective, aux éléments incertains, ce qui n'est pas le cas pour nombre d'éléments liés au changement climatique : il n'y a notamment pas de consensus sur une distribution de probabilités des dommages, ni sur celles des coûts de l'atténuation. Ainsi le cadre de l'utilité espérée n'offre pas de critère de choix entre des stratégies optimales différentes, chacune contingente au choix de la distribution a priori, aucune ne pouvant être réfutée par les connaissances existantes. Dès lors, le cadre de l'utilité espérée est d'intérêt limité pour traiter de la question de décisions face au changement climatique et des cadres alternatifs doivent être mobilisés, pour explorer non plus l'optimalité d'une décision mais sa robustesse aux incertitudes (Kunreuther et al., 2013 ; Heal et Millner, 2014).

Etner et al. (2012) donne une revue des cadres de décision sous ambiguïté. Ces cadres peuvent être classés en deux grandes catégories : (i) l'utilité espérée subjective avec des lois de distribution a priori multiples, (ii) des approches non probabilistes.

Dans la première catégorie, de l'utilité espérée subjective avec lois de distribution a priori multiples, on peut noter en particulier :

- Le maximin de l'utilité espérée (Gilboa and Schmeidler 1989). Dans ce cadre, la première étape est d'identifier les distributions (ou "priors") compatibles avec l'information connue. Les politiques sont ensuite ordonnées selon leur utilité espérée la plus faible sur l'ensemble des distributions considérées. Cette approche se concentrant sur les « mauvaises distributions », pour chaque politique, reflète une aversion à l'ambiguïté extrême. On peut préférer prendre en compte que certaines distributions sont plus plausibles que d'autres, ce que font les deux cadres suivants.
- Le *smooth ambiguity* (Klibanoff Marinaci and Mukherji 2005), attribue un poids subjectif à chaque distribution de probabilités considérée pour le choix de la stratégie optimale.
- L'approche avec « multiplications des préférences » (Hansen et Sargent, 2001), largement utilisée en macroéconomie, part d'une distribution préférée (*best-guess*) mais considère la possibilité de

se tromper sur cette distribution. Les politiques sont évaluées par l'utilité espérée à laquelle elles conduisent dans chaque distribution en ajoutant une pénalité aux distributions selon leur distance à la distribution préférée. Il y a ainsi un arbitrage entre identifier une bonne stratégie dans le cas de la distribution préférée et une stratégie qui maximise l'utilité espérée minimum sur toutes les distributions.

Dans les approches non-probabilistes, on peut citer en particulier:

- Le critère α -maximin (Arrow et Hurwicz, 1972), qui généralise le critère du maximin. Ce dernier consiste à maximiser l'utilité minimale dans le pire des cas. La généralisation ajoute la considération du meilleur des cas, et consiste à maximiser la somme de l'utilité minimale dans le pire des cas et de l'utilité maximale dans le meilleur des cas, pondérées par les coefficients α et $(1 - \alpha)$ respectivement.
- Le critère mini-max regret (Savage, 1954), qui définit le regret associé à une action dans un monde futur donné comme la différence (d'utilité) avec le maximum possible dans ce monde. Le critère de choix est alors de minimiser le regret maximum sur l'ensemble des mondes futurs possibles envisagés. Le focus est sur les opportunités manquées, plutôt que sur le pire des cas, ce qui fait de ce critère un critère moins conservateur que celui du maximin.

L'économie ne peut pas se prononcer sur un critère qui serait supérieur aux autres, il s'agit donc essentiellement d'explorer en quoi changer de cadre de décision change la décision en elle-même. Le choix entre approches probabilistes avec distributions a priori multiples et approches non-probabilistes dans le cas du climat dépend en particulier de la possibilité et de la pertinence de définir des distributions de probabilités pour les éléments incertains. Nous avons vu que cela était particulièrement délicat. Par exemple, le débat sur la pertinence d'attribuer des probabilités (subjectives) à des scénarios d'émissions n'est pas tranché (Schneider, 2001 ; Grübler et Nakicenovic, 2001). Dès lors, il conviendra à minima d'explorer la sensibilité de la décision optimale aux choix des distributions a priori, et d'explorer également les résultats d'approches non-probabilistes s'affranchissant de ce choix.

Les applications de ces cadres de décision alternatifs à l'utilité espérée à la question climatique restent rares. Un exemple récent (Drouet et al., 2015) montre que le critère de décision (utilité espérée, maximin de l'utilité espérée et maximin sont considérés) change significativement le budget carbone optimal, mais l'objectif des 2°C n'est optimal que dans un nombre restreint des cas considérés (maximin de l'utilité espérée ou maximin avec une préférence pour le présent faible et une élasticité de l'utilité marginale élevée). Néanmoins les auteurs se fondent sur des scénarios explorant une portion relativement faible de l'espace des possibles. Pour les scénarios d'émissions et les coûts de l'atténuation, ils utilisent la base de données de scénarios de l'AR5²⁷, qui contient environ 1080 scénarios issus d'une trentaine de modèles harmonisés sur un tout petit nombre de *baselines*, et en particulier dans lesquels il n'y a pas de cas de croissance faible, ou de cas où certaines régions du monde ne connaissent pas de rattrapage. Or, nous avons vu que des scénarios à hautes émissions pouvaient être associés à des croissances faibles ou des inégalités croissantes (exemple 1 dans la section 4.2 de la partie précédente). Considérer ce type de scénarios pourrait changer l'atténuation optimale. De même, Drouet et al. (2015) représentent l'incertitude sur le modèle des dommages par une incertitude sur l'exposant dans la fonction de dommage, quadratique (à la Nordhaus) ou à l'exposant 6 (à la Weitzman), ce qui n'introduit de différence notable que pour des températures élevées, au-dessus des températures d'équilibre optimales trouvées. Or, des travaux récents (en particulier Burke et al., 2015) montrent que les dommages pourraient être d'un ordre de grandeur supérieur à celui considéré jusqu'ici, y compris à des températures relativement faibles. Dans mes pistes de recherche, j'envisage donc d'explorer si/comment les résultats changent si l'on considère un ensemble plus large d'incertitudes tant sur les scénarios d'émissions que sur les dommages.

Jusqu'ici les cadres que j'envisage d'explorer reposent tous sur l'optimisation d'un critère unique (même si celui-ci intègre éventuellement des dimensions de robustesse à l'incertitude). L'idée même

²⁷ <https://secure.iiasa.ac.at/web-apps/ene/AR5DB/>.

d'optimiser un critère unique semble néanmoins limitée dans le cas des liens développement-climat où les politiques sont multi-objectifs et visent plutôt à rester ou aller vers dans un espace « désirable » en termes de croissance, d'équité, de sortie de la pauvreté, d'emploi, de climat, de santé, de sécurité énergétique et d'autres co-bénéfices et objectifs de développement. La difficulté d'arbitrage entre les critères ou de réduction à un critère unique rend pertinentes des approches permettant de considérer des objectifs multiples et des contraintes multiples. Les approches de « *tolerable window* » (Bruckner et al., 1999; Petschel-Held et al., 1999), de viabilité (Aubin et al., 2004) ou de « *robust decision making* » (Lempert et al., 2006) offrent des pistes en ce sens. J'envisage d'analyser en quoi ces trois approches sont similaires ou complémentaires, et comment elles peuvent être mobilisées. Si cette piste est plus exploratoire, elle apparaît aussi peut-être plus pertinente pour le cas des incertitudes radicales et politiques multi-objectifs qui nous occupent.

1.2. Prendre en compte les dommages - incertitude, irréversibilité, niveau : qu'est-ce qui compte ?

Afin de pouvoir prendre en compte les dommages du changement climatique dans les cadres de décision présentés ci-dessous, j'envisage d'explorer la façon de les représenter, selon les connaissances existantes. L'ambition n'est pas de représenter l'ensemble des processus par lesquels passent les dommages à l'échelle des différentes régions ou secteurs économiques, mais de se concentrer sur une exploration plus stylisée sur la nature même des mécanismes en jeu, et en quoi cela change les choses pour la décision. Plus spécifiquement, je m'intéresse à l'incertitude sur la nature des dommages et leur représentation dans les modèles d'évaluation intégrée, à travers les trois questions suivantes : (i) sur quoi portent les dommages (le niveau de production, le capital installé, la croissance, l'utilité) ? (ii) quelle est la forme des dommages (augmentation en fonction de la température ou de la vitesse de changement de la température, en fonction d'autres facteurs climatiques, présence d'effets de seuil dans cette fonction) ?, (iii) les dommages sont-ils de nature déterministe ou stochastique (augmentation de la variabilité, ou points de basculements incertains par exemple) ?

Sur le premier point, des travaux en cours avec Antonin Pottier (Guivarch et Pottier, 2015), visent à analyser comment les choix de représentation de dommages portant sur la croissance, et non plus seulement sur le niveau de production, ou induisant des chocs de croissance changent les résultats de politique optimale d'atténuation.

Sur les deux suivants, j'envisage de m'intéresser en particulier à la question des *tipping-points*, ou points de basculement, à savoir des seuils (incertains) au-delà desquels des changements abrupts et potentiellement irréversibles dans fonctionnement système couplé humains-Terre apparaissent (voir par exemple Kopp et al., 2016). Par exemple, des émissions de GES importantes pourraient survenir avec la fonte du permafrost, les changements de précipitation et de température pourraient grandement affaiblir le puits de carbone, et l'extraordinaire biodiversité, que représente la forêt amazonienne, ou la sévérité des dommages économiques pourrait augmenter de façon abrupte en cas d'affaiblissement de la circulation thermohaline²⁸.

La plupart des modèles d'évaluation intégrée du changement climatique, utilisés pour définir les politiques optimales d'atténuation du changement climatique et quantifier une valeur sociale pour le carbone, ne prennent pas en compte ce risque de franchir des « points de basculements » dans la modélisation des interactions économie-climat. De rares exceptions sont Lemoine et Traeger (2014, 2016a, 2016b), Lontzek et al. (2015) et Cai et al. (2015, 2016). Néanmoins ces études reposent sur des choix de représentation des points de basculement différents, mais tous les deux discutables. Par exemple, la modélisation dans Lontzek et al. (2015) et Cai et al. (2015, 2016) repose sur une chaîne de Markov où la probabilité de franchir un point de basculements dépend de la température, et est reste constante si la température reste constante. Cela fait du franchissement du point de basculement un

²⁸ A noter qu'il n'y a pas de consensus sur ce dernier point en particulier, une étude récente montrant des gains économiques à l'affaiblissement de la circulation thermohaline (Anthoff et al., 2016).

événement inéluctable à long-terme, si bien que des politiques d'atténuation ne peuvent qu'en décaler l'occurrence mais ne peuvent pas l'éviter. Une représentation alternative permettrait d'analyser la valeur de politiques évitant le franchissement des points de basculements, et d'évaluer les conditions dans lesquelles le non-franchissement est optimal.

L'objectif de cet axe de recherche sera de dégager les implications pour les décisions de politiques climatiques, notamment d'estimer l'assurance que nos sociétés devraient payer face aux dommages et aux incertitudes qui les caractérisent. Par ailleurs, nous nous intéresserons aux implications pour la valeur sociale du carbone, i.e. la valeur présente des dommages intertemporels résultants d'une émission marginale. Cette valeur sociale du carbone est importante car elle devrait informer le choix de la valeur tutélaire du carbone pour les analyses coûts-bénéfices des investissements et politiques publiques, et permettre de dimensionner des instruments financiers de réorientation de l'épargne mondiale (Sirkis et al., 2015) ainsi que des signaux prix tels qu'une taxe carbone.

2. Eléments d'évaluation de l'architecture internationale climatique

Le second axe de mes perspectives de recherche se situe dans la suite de mes travaux sur l'évaluation ex-ante de trajectoires et politiques d'atténuation. Il part des interrogations renouvelées par l'accord de Paris, qui entérine une approche « bottom-up » ou « fragmentée » de l'atténuation s'appuyant sur les contributions nationales (Nationally Determined Contributions, NDC).

Ces contributions nationales, et cette approche fragmentée, sont critiquées essentiellement pour deux choses : (i) elles représentent un niveau d'ambition agrégé trop faible à court-terme, i.e. des émissions globales trop élevées à l'horizon 2030, au regard de l'ambition de long-terme (voir par exemple, Rogelj et al., 2016), et (ii) elles ne sont pas coût-efficaces car elles échouent à faire émerger un prix uniforme du carbone (voir par exemple Cramton et al., 2015a). J'envisage d'explorer certaines questions soulevées par ces deux points, que je présente dans les deux sections suivantes.

2.1. Des contributions nationales trop peu ambitieuses à court-terme ? – Approche dynamique et articulation court-terme long-terme

Un préalable à l'analyse de l'articulation entre ambition faible à court-terme (contenue dans les NDC) et objectifs de long-terme ambitieux (les 2°C ou 1.5°C), consiste à évaluer précisément le niveau d'émissions en 2030 auquel pourraient conduire les NDC, ainsi que ses déterminants principaux parmi, notamment, les engagements conditionnels et les incertitudes sur la croissance des pays ayant annoncé des objectifs en intensité carbone de leur PIB (Chine et Inde en particulier). Je contribue à des travaux en ce sens dans la suite de mon implication dans le Groupe Interdisciplinaire sur les Contributions Nationales créé à l'occasion de la COP21 (GICN, 2015).

La faible ambition en termes de réduction des émissions à court-terme soulève des questions (i) de risque d'accroissement du legs en termes d'émissions du capital installée à l'horizon 2030, (ii) de risque liés à des trajectoires d'atténuation reposant sur des réductions rapides après 2030 et un recours massif à des émissions négatives, et (iii) de conditions dans lesquelles le niveau d'ambition de court terme pourrait être relevé.

La première question, du risque d'accroissement du legs en termes d'émissions du capital installé, résulte de l'irréversibilité des investissements et des longues durées de vie du capital en jeu (voir Section 3.2 de la Partie précédente). Tout délai à l'atténuation ambitieuse, si la réduction rapide des émissions post-2030 n'est pas anticipée, risque de perpétuer un capital installé au contenu carbone élevé et d'exacerber la question de l'abandon prématuré de capital existant (*stranded-assets*) pour la

trajectoire post-2030. A partir de la représentation des NDC dans le modèle Imaclim-R monde, nous viserons à évaluer les transformations structurelles et technologiques, ainsi que le contenu carbone du nouveau capital à l'horizon 2030, qu'impliquent ces contributions nationales. Nous étudierons également comment ces éléments varient par grandes régions du monde et par secteurs économiques, et comment ils varient avec des niveaux d'ambition de court-terme relevés. Une approche par ensemble de scénarios, telle que présentée dans la section 4 du bilan de mes travaux, devrait permettre de faire ressortir les résultats robustes et les déterminants principaux de l'incertitude sur les résultats, notamment pour des indicateurs des transformations structurelles et technologiques, tels que les parts de marchés de technologies nouvelles à certaines dates, les taux annuels d'amélioration des intensités énergétiques et carbones des différents secteurs, etc. ; l'objectif étant de mettre en évidence des « fenêtres de passage » pour ces indicateurs.

La seconde question pose celle de l'arbitrage entre (i) le recours massif à des émissions négatives à la fin du siècle, recours qui risque de ne pas être possible ou d'avoir des effets secondaires importants, et (ii) la faisabilité et les coûts d'une bifurcation rapide des émissions après 2030. Nous évaluerons cet arbitrage en évaluant des trajectoires d'émissions alternatives (combinant des réductions d'émissions plus ou moins rapides après 2030 avec un recours plus ou moins important à des émissions négatives) simultanément avec le modèle IAM Imaclim-R monde (et éventuellement d'autres modèles dans un cadre d'exercice de comparaison de modèles pour évaluer la robustesse des résultats à l'incertitude structurelle sur les modèles) et des modèles de cycle du carbone et de climat. Ce travail s'inscrit dans la continuité de Gasser et al. (2015), et vise en particulier à évaluer la valeur d'assurance que représentent des réductions rapides et précoces contre l'incertitude sur les potentiels et coûts des technologies d'émissions négatives.

La troisième question sera abordée à travers l'analyse comparée de trajectoires alternatives représentant les NDC par rapport à des trajectoires d'atténuation plus ambitieuses à court-terme, résultants des travaux sur les deux questions précédentes. Cette analyse visera à dégager les implications de ces trajectoires alternatives en termes de développement, d'inégalités et de synergies ou arbitrages avec d'autres objectifs de politiques. Un des éléments important pour l'analyse des conditions d'augmentation du niveau d'ambition à court-terme²⁹, même si ce n'est pas le seul, est le coût de l'atteinte d'un niveau donné d'ambition, d'où l'importance de l'analyse du coût-efficacité de l'architecture climatique internationale, que j'aborde dans la section suivante.

2.2. Des contributions nationales fragmentées donc non coût-efficaces ? – La question de la différenciation

Certaines critiques de l'approche « bottom-up » que représentent les NDC partent du diagnostic qu'elle échoue à faire émerger un prix du carbone uniforme, et plaident alors soit pour une négociation sur un prix du carbone comme attracteur (Weitzman, 2015, Cramton et al., 2015b), soit pour une interconnexion entre contributions nationales pour donner la flexibilité de réaliser les réductions d'émissions là où elles sont les moins chères (Bodansky et al., 2015).

Pourtant, un résultat classique montre qu'un prix unique du carbone n'est optimal qu'en l'absence de contrainte sur des transferts forfaitaires entre pays (Sandmo, 2007). En l'absence de contrainte sur ces transferts, il y a séparabilité entre équité et (coût-)efficacité³⁰ et un prix unique est optimal. Si les

²⁹ L'augmentation du niveau d'ambition des NDC est un des enjeux majeur de la révision des NDC prévue tous les 5 ans dans l'accord de Paris.

³⁰ Un résultat peut être un peu moins connu, mais néanmoins classique, montre que dans le cas de la production d'un bien public il y a non-séparabilité entre équité et efficacité (voir par exemple Chichilnisky et Heal (2000) pour une synthèse des différentes contributions et Sheeran (2006) pour une ré-explication du résultat). Dans le cas de l'atténuation du changement climatique (bien public global) cela signifie que le choix du plafond d'émissions doit être fait simultanément avec celui des transferts. L'unicité du prix du carbone, en elle-même, ne garantit pas l'efficacité.

transferts sont limités, l'optimum correspond à des prix différenciés entre pays. Ce résultat met ainsi la question des transferts entre pays sur le devant de la scène ; et ceux-ci étant pour sûr limités dans le monde réel, l'optimalité du prix unique n'est pas assurée.

A partir des scénarios NDC discutés dans la section précédente, et différentes variantes explorant plusieurs configurations d'interconnexions entre les régions³¹ ou de formation de « Clubs³² », nous viserons à évaluer les différentes variantes selon les deux axes équité et efficacité. En particulier, nous étudierons comment les différentes variantes influencent les prix sous-jacents du carbone dans les différentes régions du monde, les coûts de l'atténuation et les inégalités inter-régionales. Nous quantifierons également les flux internationaux de biens et de capitaux induits par ces variantes, pour analyser la question des transferts. Enfin, ces analyses nous permettront de contribuer à la littérature sur la comparaison de l'ambition des NDC entre elles et les implications en termes d'équité, dans laquelle l'équité n'a jusqu'à présent été jugée que sur la base des émissions (voir par exemple Robiou du Pont et al., 2016), sans considération de coût ou de bien-être.

Les perspectives de recherche décrites jusqu'ici dans ce deuxième axe s'appuieront largement sur le modèle Imacsim-R monde, et nécessiteront un certain nombre de développement du modèle. D'une part, nous poursuivrons les développements permettant de représenter des politiques plus diverses que des politiques de tarification du carbone seules, nécessaires pour la représentation des NDC. D'autre part, un effort de développement du modèle portera sur l'amélioration de la représentation du commerce et des dynamiques des flux de capitaux internationaux. De façon assez évidente, la représentation du commerce et des flux de capitaux est déterminante pour l'évaluation de politiques internationales « fragmentées » ou de formation de « Clubs », puisqu'il s'agit des principaux mécanismes d'interconnexions entre les régions du monde et donc de transmission des effets de politiques prises dans une région du monde vers les autres régions du monde. Par exemple, des travaux récents (Balistreri et al., 2015) ont montré que changer la représentation du commerce de la représentation classique à la Armington (qui est celle adoptée dans la plupart des IAM, dont Imacsim-R monde) à une représentation reposant sur des travaux plus récents (Melitz, 2003) était de nature à changer jusqu'au signe des résultats. Nous explorerons donc comment intégrer cette représentation plus récente dans l'architecture d'Imacsim-R et dans quelle mesure cela change les évaluations.

J'envisage également de contribuer à travailler sur 3 questions plus spécifiques soulevées dans le cadre de l'architecture internationale climatique, avec des travaux de natures différentes : (i) méthodologique, (ii) quantitative, ou (iii) plus théorique :

Articulation global-local : contribution méthodologique

L'approche « bottom-up » des contributions nationales renouvelle également les défis méthodologiques pour les modélisateurs. Il va s'agir en effet d'être capables d'articuler entre eux scénarios et modèles à diverses échelles géographiques pour évaluer dans quelle mesure les scénarios nationaux sont construits sur des contextes internationaux plausibles et cohérents, et, inversement, dans quelle mesure les scénarios globaux intègrent des visions réalistes des politiques et évolutions nationales. L'état de l'art montre que cette cohérence entre scénarios nationaux et globaux n'est pas assurée (Pye et al., 2016), alors même que l'analyse de sensibilité sur les conditions « aux limites » (prix internationaux, élasticité prix des exports...) des scénarios nationaux montre que ces conditions aux limites peuvent changer le signe même des résultats (par exemple Schers et al., 2015). Dans ce

Par ailleurs, des distorsions sur les fiscalités nationales, si elles ne sont pas seulement la « bonne » internationalisation d'externalités locales différentes, peuvent également conduire à un cas où l'unicité du prix du carbone ne serait pas optimale.

³¹ Nous pourrions évaluer des interconnexions au niveau d'économies entières ou par le biais d'accords sectoriels, dans la suite de nos travaux sur le sujet notamment (Hamdi-Cherif et al., 2011).

³² La proposition de « *Climate Clubs* » vient de Nordhaus (2015). L'auteur y montre que sans sanction à l'encontre des non-participants, il n'y a pas de coalition stable en dehors de celles avec des réductions d'émissions très faibles. À l'inverse, un régime avec des pénalités douanières pour les non-participants, un « *Climate Club* », peut conduire à une grande coalition stable avec des réductions d'émissions substantielles.

cadre du nécessaire dialogue, à double sens, entre échelles géographiques, j'envisage d'explorer les apports potentiels de méthodes d'ensembles de scénarios et d'analyse permettant d'identifier les principaux déterminants de tel ou tel type de résultat, telles que celles présentées dans la section 4 de la partie bilan de ce dossier, comme méthodologie de construction de ce dialogue. Ce type de méthode peut en effet permettre d'identifier un petit nombre de scénarios autour desquels il est particulièrement pertinent d'articuler le dialogue entre modélisation à des échelles géographiques différentes.

Revisiter la quantification des besoins d'investissements le long d'une trajectoire « bas-carbone »

Une des questions clés dans les négociations climatiques internationales est celle du financement des politiques climatiques. Un préalable à cette question du financement est la quantification des besoins d'investissements le long d'une trajectoire « bas-carbone ». Très peu d'études ont évalué quantitativement ces besoins (voir chapitre 16 de IPCC, 2014), et ces études sont limitées aux investissements dans le secteur énergétique et se sont focalisées sur un petit nombre de scénarios. Elles concluent à des investissements supplémentaires nécessaires dans le secteur énergétique. Pourtant la différence de « contenu » des investissements entre une trajectoire « bas-carbone » et une trajectoire carbonée ne se résume pas au seul secteur énergétique. En particulier, les investissements dans les infrastructures (de transport, de bâtiments, de formes urbaines) doivent également être réorientés (voir Section 3.2 de la Partie précédente). La question de ces investissements en infrastructure est d'autant plus importante dans le contexte actuel de « fenêtre d'opportunité » pour éviter un *lock-in* dans des infrastructures sous-tendant un développement carboné dans les pays émergents et en développement qui connaissent une urbanisation et une construction des infrastructures rapides d'une part, et d'infrastructures vieillissantes dont la maintenance pose des difficultés financières dans les pays développés d'autre part.

A la suite des travaux présentés en Section 3.2 du bilan (Waisman et al., 2012, 2013), j'envisage de poursuivre les analyses pour évaluer les besoins d'investissements dans les infrastructures de transport, et leurs déterminants principaux. L'approche intersectorielle sera intéressante pour, en particulier, étudier les interactions entre secteurs des transports et énergétique dont l'effet net est a priori ambigu : par exemple une décarbonisation des transports, si elle passe par son électrification, peut engendrer des besoins en investissement supplémentaires pour les réseaux électriques et les capacités de production d'électricité mais diminue les besoins en investissement pour le transport de carburants liquide (pipelines, etc.).

Différenciation car hétérogénéité – une approche par les jeux dynamiques

Une autre des questions clés dans les négociations climatiques internationales, et en particulier dans l'accord de Paris, a été celle de la différenciation entre pays, dans la logique des « responsabilités communes mais différenciées et [des] capacités respectives » (article 3 de la Convention Climat de 1992).

Dans des travaux en cours avec Louis-Gaëtan Giraudet nous éclairons cette question de la différenciation à travers une approche par les jeux dynamiques. L'approche des jeux dynamiques (qui combine théorie des jeux et contrôle optimal intertemporel) de la question du changement climatique l'a essentiellement traitée comme celle d'un mal public imposant des dommages identiques à tous les pays (van der Ploeg and de Zeeuw, 1992). Nous proposons d'étendre le jeu dynamique canonique sur le changement climatique pour prendre en compte trois faits stylisés : (i) alors que des dommages sont attendus pour la plupart des pays, ces dommages sont hétérogènes et certains pays anticipent des bénéfices du changement climatique à court-terme, (ii) les coûts de l'atténuation sont également hétérogènes, et pas nécessairement corrélés à l'exposition des pays aux dommages, et (iii) certaines technologies d'adaptation, telles que la climatisation, exacerbent le réchauffement. Nous envisagerons comment l'effet net de ces différentes externalités joue sur la température et le bien-être optimal, ainsi que dans des stratégies myopes ou prenant en compte des rétroactions. Les sources d'asymétries décrites ajoutent un élément de *free-driving* à la question classique du *free-riding* : certains pays

peuvent avoir une contribution « trop » importante (par rapport à la situation coopérative) dans un régime non-coopératif. De plus, elles réduisent à priori les possibilités d'amélioration de Pareto sans transferts, et peuvent justifier une différenciation des prix Pigouviens entre pays. In fine, nous avons pour objectif de contribuer à élargir le concept de bien public dans la question climatique. Avec d'autres notions, telles que les maux publics impurs (Kotchen, 2005) ou les *climate clubs* (Nordhaus, 2015), notre conception en tant que mal public asymétrique suggère que la question climatique est plus complexe que celle d'une externalité négative globale.

Ce programme de travail est ambitieux, il va de soi que je ne vais pas le mettre en œuvre seule, d'où, notamment, ce dossier de demande d'Habilitation à Diriger des Recherches.

IV. Bibliographie³³

- Acemoglu, Daron, Philippe Aghion, Leonardo Bursztyn, et David Hemous. 2012. « The Environment and Directed Technical Change ». *The American Economic Review* 102 (1): 131-66.
- Ackerman, Frank, Stephen J. DeCanio, Richard B. Howarth, et Kristen Sheeran. 2009. « Limitations of Integrated Assessment Models of Climate Change ». *Climatic Change* 95 (3-4): 297-315.
- Alcamo, Joseph. 2008. « The SAS approach: combining qualitative and quantitative knowledge in environmental scenarios ». *Environmental futures: The practice of environmental scenario analysis* 2: 123-50.
- Anthoff, D., R. S. J. Tol, et G. W. Yohe. 2009. « Risk aversion, time preference, and the social cost of carbon ». *Environmental Research Letters* 4: 24002.
- Anthoff, David, et Richard SJ Tol. 2010. « On international equity weights and national decision making on climate change ». *Journal of Environmental Economics and Management* 60 (1): 14-20.
- Anthoff, David, et Richard SJ Tol. 2014. « The income elasticity of the impact of climate change ». *Is the Environment a Luxury?: An Inquiry into the Relationship Between Environment and Income*, 34-47.
- Anthoff, David, Francisco Estrada, et Richard S. J. Tol. 2016. « Shutting Down the Thermohaline Circulation ». *American Economic Review* 106 (5): 602-6.
- Arrow, K. J., et A. C. Fisher. 1974. « Environmental preservation, uncertainty, and irreversibility ». *The Quarterly Journal of Economics*, 312-19.
- Arrow, Kenneth J., et Leonid Hurwicz. 1972. « An optimality criterion for decision-making under ignorance ». *Uncertainty and expectations in economics*, 1-11.
- Aubin, Jean-Pierre, Telma Bernado, et Patrick Saint-Pierre. 2005. « A viability approach to global climate change issues ». In *The Coupling of Climate and Economic Dynamics*, 113-43. Springer.
- Azar, C., K. Lindgren, M. Obersteiner, K. Riahi, D. P. van Vuuren, KMGJ den Elzen, K. Möllersten, et E. D. Larson. 2010. « The feasibility of low CO₂ concentration targets and the role of bio-energy with carbon capture and storage (BECCS) ». *Climatic Change* 100 (1): 195-202.
- Baker, Erin, Valentina Bosetti, Laura Diaz Anadon, Max Henrion, et Lara Aleluia Reis. 2015. « Future costs of key low-carbon energy technologies: Harmonization and aggregation of energy technology expert elicitation data ». *Energy Policy* 80: 219-32.
- Balistreri, Edward J., Christoph Bohringer, et Thomas F. Rutherford. 2015. « Carbon policy and the structure of global trade ». Working Paper 2015-02. Colorado School of Mines, Division of Economics and Business.
- Bankes, Steve. 1993. « Exploratory modeling for policy analysis ». *Operations research* 41 (3): 435-49.
- Barker, Terry, Athanasios Dagoumas, et Jonathan Rubin. 2009. « The macroeconomic rebound effect and the world economy ». *Energy efficiency* 2 (4): 411-27.
- Benson, S. M., K. Bennaceur, P. Cook, J. Davison, H. de Coninck, K. Farhat, C. A. Ramirez, et al. 2012. Chapter 13 - Carbon Capture and Storage. In *Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future*, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 993-1068.
- Blanco G., R. Gerlagh, S. Suh, J. Barrett, H. C. de Coninck, C. F. Diaz Morejon, R. Mathur, N. Nakicenovic, A. Ofosu Ahenkora, J. Pan, H. Pathak, J. Rice, R. Richels, S. J. Smith, D. I. Stern, F. L. Toth, and P. Zhou, 2014: Drivers, Trends and Mitigation. In:

³³ Je ne fais pas figurer dans cette bibliographie les articles dont je suis co-auteur : leurs références sont données dans mon Curriculum Vitae détaillé, Partie I de ce dossier.

- Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Bodansky, Daniel M., Seth A. Hoedl, Gilbert E. Metcalf, et Robert N. Stavins. 2015. « Facilitating Linkage of Climate Policies through the Paris Outcome ». *Climate Policy*, juillet, 1-17.
- Bovenberg, A. L. 1999. « Green tax reforms and the double dividend: an updated reader's guide ». *International Tax and Public Finance* 6 (3): 421-43.
- Bruckner, Thomas, Gerhard Petschel-Held, Ferenc L. Toth, H.-M. Fussel, C. Helm, M. Leimbach, et H.-J. Schellnhuber. 1999. « Climate change decision-support and the tolerable windows approach ». *Environmental Modeling & Assessment* 4 (4): 217-34.
- Burke, Marshall, Solomon M. Hsiang, et Edward Miguel. 2015. « Global Non-Linear Effect of Temperature on Economic Production ». *Nature* 527 (7577): 235-39.
- Cai, Yongyang, Kenneth L. Judd, Timothy M. Lenton, Thomas S. Lontzek, et Daiju Narita. 2015. « Environmental Tipping Points Significantly Affect the Cost-benefit Assessment of Climate Policies ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112 (15): 4606-11.
- Cai, Yongyang, Timothy M. Lenton, et Thomas S. Lontzek. 2016. « Risk of Multiple Interacting Tipping Points Should Encourage Rapid CO₂ Emission Reduction ». *Nature Climate Change* 6 (5): 520-25.
- Campolongo, Francesca, Jessica Cariboni, et Andrea Saltelli. 2007. « An effective screening design for sensitivity analysis of large models ». *Environmental modelling & software* 22 (10): 1509-18.
- Caron, Justin, et Markus Ohndorf. 2010. « Irreversibility and optimal timing of climate policy ». *Institute for Environmental Decisions Working Paper*, n° 14.
- Chichilnisky, Graciela, et G. M. Heal. 2000. *Environmental markets. Equity and Efficiency*. Columbia University Press. New York.
- Christensen, Peter, Kenneth Gillingham, et William Nordhaus. 2016. « Uncertainty in Forecasts of Long-Run Productivity Growth ». NBER.
- Clarke, Leon, Jae Edmonds, Volker Krey, Richard Richels, Steven Rose, et Massimo Tavoni. 2009. « International climate policy architectures: Overview of the EMF 22 International Scenarios ». *Energy Economics* 31: S64-S81.
- Cooke, Roger M. 2015. « Messaging Climate Change Uncertainty ». *Nature Climate Change* 5 (1): 8-10.
- Cramton, Peter, Ockenfels Axel, et Steven Stoft. 2015a. « Symposium on "International Climate Negotiations" - Introduction ». *Economics of Energy & Environmental Policy* 4 (2).
- Cramton, Peter, Axel Ockenfels, et Steven Stoft. 2015b. « An International Carbon-Price Commitment Promotes Cooperation ». *Economics of Energy & Environmental Policy* 4 (2).
- Dahan-Dalmedico, Amy. 2007. *Les modèles du futur: changement climatique et scénarios économiques: enjeux scientifiques et politiques*. La Découverte.
- David, P. A. 1985. « Clio and the Economics of QWERTY ». *The American Economic Review*, 332-37.
- Davis, Steven J, Ken Caldeira, et H Damon Matthews. 2010. « Future CO₂ emissions and climate change from existing energy infrastructure ». *Science* 329 (5997): 1330-1333.
- Dennig, Francis, Mark B. Budolfson, Marc Fleurbaey, Asher Siebert, et Robert H. Socolow. 2015. « Inequality, Climate Impacts on the Future Poor, and Carbon Prices ». *Proceedings of the National Academy of Sciences*, décembre, 201513967.

Dietz, Simon. 2012. « The treatment of risk and uncertainty in the US social cost of carbon for regulatory impact analysis ». *Economics* 6.

Drouet, L., V. Bosetti, et M. Tavoni. 2015. « Selection of Climate Policies under the Uncertainties in the Fifth Assessment Report of the IPCC ». *Nature Climate Change* 5 (10): 937-40.

Ebi, Kristie L., Stephane Hallegatte, Tom Kram, Nigel W. Arnell, Timothy R. Carter, Jae Edmonds, Elmar Kriegler, et al. 2014. « A New Scenario Framework for Climate Change Research: Background, Process, and Future Directions ». *Climatic Change* 122 (3): 363-72.

Edmonds, James, Patrick Luckow, Katherine Calvin, Marshall Wise, Jim Dooley, Page Kyle, Son H. Kim, Pralit Patel, et Leon Clarke. 2013. « Can radiative forcing be limited to 2.6 Wm⁻² without negative emissions from bioenergy and CO₂ capture and storage? ». *Climatic Change* 118 (1): 29-43.

Etner, Johanna, Meglena Jeleva, et Jean-Marc Tallon. 2012. « Decision theory under ambiguity ». *Journal of Economic Surveys* 26 (2): 234-70.

Fisher, Anthony C. 2000. « Investment under uncertainty and option value in environmental economics ». *Resource and Energy Economics* 22 (3): 197-204.

Fleurbaey, Marc. 2009. « Beyond GDP: The quest for a measure of social welfare ». *Journal of Economic Literature*, 1029-75.

Fragnière, Emmanuel, Roman Kanala, Francesco Moresino, Adriana Reveiu, et Ion Smeureanu. 2016. « Coupling Techno-Economic Energy Models with Behavioral Approaches ». *Operational Research*, mai, 1-15.

Freixas, Xavier, et Jean-Jacques Laffont. 1984. « On the irreversibility effect ». *Bayesian models in economic theory*, 105-14.

Friedman, Jerome H., et Nicholas I. Fisher. 1999. « Bump hunting in high-dimensional data ». *Statistics and Computing* 9 (2): 123-43.

Fuss, Sabine, Josep G. Canadell, Glen P. Peters, Massimo Tavoni, Robbie M. Andrew, Philippe Ciais, Robert B. Jackson, et al. 2014. « Betting on Negative Emissions ». *Nature Climate Change* 4 (10): 850-53.

Geden, Oliver, et Silke Beck. 2014. « Renegotiating the Global Climate Stabilization Target ». *Nature Climate Change* 4 (9): 747-48.

Geden, Oliver. 2015. « Policy: Climate advisers must maintain integrity. » *Nature* 521 (7550): 27.

Gerland, Patrick, Adrian E. Raftery, Hana Ševčíková, Nan Li, Danan Gu, Thomas Spoorenberg, Leontine Alkema, et al. 2014. « World Population Stabilization Unlikely This Century ». *Science* 346 (6206): 234-37.

GICN (Groupe Interdisciplinaire sur les Contributions Nationales). 2015. Working Paper. IPSL Climate Modelling Center Scientific Note n°33.
http://icmc.ipsl.fr/images/publications/scientific_notes/GICN_working_paper2.pdf

Gilboa, Itzhak, et David Schmeidler. 1989. « Maxmin expected utility with non-unique prior ». *Journal of mathematical economics* 18 (2): 141-53.

Gollier, C., B. Jullien, et N. Treich. 2000. « Scientific progress and irreversibility: an economic interpretation of the 'Precautionary Principle' ». *Journal of Public Economics* 75 (2): 229-53.

Gollier, C., et N. Treich. 2003. « Decision-making under scientific uncertainty: The economics of the precautionary principle ». *Journal of Risk and Uncertainty* 27 (1): 77-103.

Gollier, Christian. 2013. *Pricing the planet's future: the economics of discounting in an uncertain world*. Princeton University Press.

- Goulder, L. H. 1995. « Environmental taxation and the double dividend: a reader's guide ». *International Tax and Public Finance* 2 (2): 157-83.
- Grübler, Arnulf, et Nebojša Nakicenovic. 2001. « Identifying dangers in an uncertain climate ». *Nature* 412 (6842): 15.
- Guesnerie, Roger. 1992. « Est-il rationnel d'avoir des anticipations rationnelles? » *L'Actualité économique* 68 (4): 544-59.
- Gusdorf, F., S. Hallegatte, et A. Lahellec. 2008. « Time and space matter: how urban transitions create inequality ». *Global Environmental Change* 18 (4): 708-19.
- Ha-Duong, M., M. J. Grubb, et J. C. Hourcade. 1997. « Influence of socioeconomic inertia and uncertainty on optimal CO₂-emission abatement ». *Nature* 390: 271.
- Ha-Duong, Minh. 1998. « Quasi-option value and climate policy choices ». *Energy Economics* 20 (5-6): 599-620.
- Hammit, James K., Robert J. Lempert, et Michael E. Schlesinger. 1992. « A sequential-decision strategy for abating climate change ». *Nature* 357 (6376): 315-18.
- Hanemann, W. Michael. 1989. « Information and the concept of option value ». *Journal of Environmental Economics and Management* 16 (1): 23-37.
- Hannart, Alexis, Michael Ghil, Jean-Louis Dufresne, et Philippe Naveau. 2013. « Disconcerting Learning on Climate Sensitivity and the Uncertain Future of Uncertainty ». *Climatic Change* 119 (3-4): 585-601.
- Hansen, Lars Peter, et Thomas J. Sargent. 2001. « Robust control and model uncertainty ». *The American Economic Review* 91 (2): 60-66.
- Hawkins, Ed, et Rowan Sutton. 2009. « The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions ». *Bulletin of the American Meteorological Society* 90 (8): 1095.
- Heal, Geoffrey, et Antony Millner. 2014. « Uncertainty and Decision Making in Climate Change Economics ». *Review of Environmental Economics and Policy* 8 (1): 120-37.
- Henry, C. 1974. « Investment decisions under uncertainty: the "Irreversibility Effect" ». *The American Economic Review*, 1006-12.
- IPCC. 2013. « The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change ». K., Tignor, M., Allen, SK, Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, PM, Eds, 1535.
- IPCC. 2014. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jaccard, M., et N. Rivers. 2007. « Heterogeneous capital stocks and the optimal timing for CO₂ abatement ». *Resource and Energy Economics* 29 (1): 1-16.
- Jakob, Michael, Markus Haller, et Robert Marschinski. 2012. « Will history repeat itself? Economic convergence and convergence in energy use patterns ». *Energy Economics* 34 (1): 95-104.
- Jaeger, Carlo C., et Julia Jaeger. 2011. « Three views of two degrees ». *Regional Environmental Change* 11 (1): 15-26.
- Johansen, Leif. 1959. « Substitution versus Fixed Production Coefficients in the Theory of Economic Growth: A Synthesis ». *Econometrica* 27 (2): 157-76.

- Johnson, Nils, Volker Krey, David L. McCollum, Shilpa Rao, Keywan Riahi, et Joeri Rogelj. 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, Part A: 89-102.
- Klibanoff, Peter, Massimo Marinacci, et Sujoy Mukerji. 2005. « A smooth model of decision making under ambiguity ». *Econometrica* 73 (6): 1849-92.
- Knight, Frank H. 1921. « Risk, uncertainty and profit ». *New York: Hart, Schaffner and Marx*.
- Kolstad, Charles D. 1996. « Fundamental irreversibilities in stock externalities ». *Journal of Public Economics* 60 (2): 221-33.
- Koomey, Jonathan. 2013. « Moving beyond benefit–cost analysis of climate change ». *Environmental Research Letters* 8 (4): 41005.
- Kopp, Robert E., Rachael Shwom, Gernot Wagner, et Jiacan Yuan. 2016. « Tipping Elements and Climate-Economic Shocks: Pathways toward Integrated Assessment ». *Earth's Future*, 016EF000362.
- Kotchen, Matthew J. 2005. « Impure public goods and the comparative statics of environmentally friendly consumption ». *Journal of environmental economics and management* 49 (2): 281-300.
- Krey, Volker. 2014. « Global energy-climate scenarios and models: a review ». *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment* 3 (4): 363-83.
- Kriegler, Elmar, John P. Weyant, Geoffrey J. Blanford, Volker Krey, Leon Clarke, Jae Edmonds, Allen Fawcett, et al. 2014. « The Role of Technology for Achieving Climate Policy Objectives: Overview of the EMF 27 Study on Global Technology and Climate Policy Strategies ». *Climatic Change* 123 (3-4): 353-67.
- Kriegler, Elmar, Nils Petermann, Volker Krey, Valeria Jana Schwanitz, Gunnar Luderer, Shuichi Ashina, Valentina Bosetti, et al. 2015. « Diagnostic indicators for integrated assessment models of climate policy ». *Technological Forecasting and Social Change* 90, Part A (janvier): 45-61.
- Kriegler, Elmar, Ioanna Mouratiadou, Gunnar Luderer, Jae Edmonds, et Ottmar Edenhofer. 2016. « Introduction to the RoSE Special Issue on the Impact of Economic Growth and Fossil Fuel Availability on Climate Protection ». *Climatic Change* 136 (1): 1-6.
- Kunreuther, Howard, Geoffrey Heal, Myles Allen, Ottmar Edenhofer, Christopher B. Field, et Gary Yohe. 2013. « Risk management and climate change ». *Nature Climate Change* 3 (5): 447-50.
- Lemoine, Derek, et Christian Traeger. 2014. « Watch your step: Optimal policy in a tipping climate ». *American Economic Journal: Economic Policy* 6 (1): 137-66.
- Lemoine, Derek, et Christian P. Traeger. 2016a. « Economics of Tipping the Climate Dominoes ». *Nature Climate Change* 6 (5): 514-19.
- Lemoine, Derek, et Christian P. Traeger. 2016b. « Ambiguous tipping points ». *Journal of Economic Behavior & Organization* (forthcoming).
- Lempert, R. J. 2002. « A new decision sciences for complex systems ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 99 (Suppl 3): 7309-13.
- Lempert, Robert J., Steven W. Popper, et Steven C. Bankes. 2003. *Shaping the Next One Hundred Years: New Methods for Quantitative, Long-Term Policy Analysis*. Rand Corporation.
- Lempert, R. J., D. G. Groves, S. W. Popper, et S. C. Bankes. 2006. « A general, analytic method for generating robust strategies and narrative scenarios ». *Management Science*, 514-28.

- Lontzek, Thomas S., Yongyang Cai, Kenneth L. Judd, et Timothy M. Lenton. 2015. « Stochastic Integrated Assessment of Climate Tipping Points Indicates the Need for Strict Climate Policy ». *Nature Climate Change* 5 (5): 441-44.
- Lutz, Wolfgang, William Butz, Samir Kc, Warren Sanderson, et Sergei Scherbov. 2014. « Population Growth: Peak Probability ». *Science* 346 (6209): 561-561.
- Manne, Alan Sussmann, et Richard G. Richels. 1992. *Buying greenhouse insurance: the economic costs of carbon dioxide emission limits*. MIT press.
- Manne, A., et R. Richels. 1995. « Greenhouse debate: economic efficiency, burden sharing and hedging strategies ». *Energy Journal* 16 (4): 1-37.
- Marten, Alex L. 2011. « Transient Temperature Response Modeling in IAMs: The Effects of Over Simplification on the SCC ». *Economics: The Open-Access, Open-Assessment E-Journal* 5 (2011-18): 1.
- McGlade, Christophe, et Paul Ekins. 2015. « The Geographical Distribution of Fossil Fuels Unused When Limiting Global Warming to 2 °C ». *Nature* 517 (7533): 187-90.
- Melitz, Marc J. 2003. « The impact of trade on intra-industry reallocations and aggregate industry productivity ». *Econometrica* 71 (6): 1695-1725.
- Mensink, Paul, et Till Requate. 2005. « The Dixit-Pindyck and the Arrow-Fisher-Hanemann-Henry option values are not equivalent: a note on Fisher (2000) ». *Resource and Energy Economics* 27 (1): 83-88.
- Morris, Max D. 1991. « Factorial sampling plans for preliminary computational experiments ». *Technometrics* 33 (2): 161-74.
- Morgan, M. G., et D. W. Keith. 2008. « Improving the way we think about projecting future energy use and emissions of carbon dioxide ». *Climatic Change* 90 (3): 189-215.
- Moss, Richard H., Jae A. Edmonds, Kathy A. Hibbard, Martin R. Manning, Steven K. Rose, Detlef P. van Vuuren, Timothy R. Carter, et al. 2010. « The next generation of scenarios for climate change research and assessment ». *Nature* 463 (7282): 747-56.
- Nakicenovic, Nebojsa, Joseph Alcamo, Gerald Davis, Bert de Vries, Joergen Fenhann, Stuart Gaffin, Kenneth Gregory, et al. 2000. *Special Report on Emissions Scenarios: a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- New, Mark, Diana Liverman, Heike Schroder, et Kevin Anderson. 2011. « Four Degrees and beyond: The Potential for a Global Temperature Increase of Four Degrees and Its Implications ». *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 369 (1934): 6-19.
- Nordhaus, W. D. 1992. « An optimal transition path for controlling greenhouse gases ». *Science* 258 (5086): 1315-19.
- Nordhaus, W. D. 2007. « Who's Afraid of a Big Bad Oil Shock? » *Brookings Papers on Economic Activity* 2: 219.
- Nordhaus, William D. 2008. *A question of balance: Weighing the options on global warming policies*. Yale University Press.
- Nordhaus, William D. 2011. « The economics of tail events with an application to climate change ». *Review of Environmental Economics and Policy* 5 (2): 240-57.
- Nordhaus, 2013. Integrated Economic and Climate Modelling. In: *Handbook of Computable General Equilibrium Modelling* [Eds. Dixon, P.B. et Jorgenson, DW]. Newnes.
- Nordhaus, William. 2014. « Estimates of the social cost of carbon: concepts and results from the DICE-2013R model and alternative approaches ». *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists* 1 (1): 273-312.

Nordhaus, William. 2015. « Climate clubs: overcoming free-riding in international climate policy ». *The American Economic Review* 105 (4): 1339-70.

OCDE. 2001. « La mesure du capital - Manuel de l'OCDE - La mesure des stocks de capital, de la consommation de capital fixe et des services du capital ». *OCDE Statistiques*.

O'Neill, Brian C., Elmar Kriegler, Keywan Riahi, Kristie L. Ebi, Stephane Hallegatte, Timothy R. Carter, Ritu Mathur, et Detlef P. van Vuuren. 2014. « A new scenario framework for climate change research: The concept of shared socioeconomic pathways ». *Climatic Change* 122 (3): 387-400.

O'Neill, Brian C., Elmar Kriegler, Kristie L. Ebi, Eric Kemp-Benedict, Keywan Riahi, Dale S. Rothman, Bas J. van Ruijven, et al. 2015. « The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century ». *Global Environmental Change*.

Oppenheimer, Michael, Brian C. O'Neill, et Mort Webster. 2008. « Negative learning ». *Climatic Change* 89 (1-2): 155-72.

Page, Scott E. 2006. « Path dependence ». *Quarterly Journal of Political Science* 1 (1): 87-115.

Parson, Edward A., et Darshan Karwat. 2011. « Sequential Climate Change Policy ». *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 2 (5): 744-56.

Petschel-Held, Gerhard, Hans-Joachim Schellnhuber, Thomas Bruckner, Ferenc L. Toth, et Klaus Hasselmann. 1999. « The tolerable windows approach: theoretical and methodological foundations ». *Climatic Change* 41 (3-4): 303-31.

Peters, Glen P., Robbie M. Andrew, Tom Boden, Josep G. Canadell, Philippe Ciais, Corinne Le Quéré, Gregg Marland, Michael R. Raupach, et Charlie Wilson. 2013. « The challenge to keep global warming below 2 C ». *Nature Climate Change* 3 (1): 4-6.

Pindyck, Robert S. 1991. « Irreversibility, Uncertainty, and Investment ». *Journal of Economic Literature* 29 (3): 1110-48. doi:10.2307/2727613.

Pindyck, Robert S. 2011. « Fat tails, thin tails, and climate change policy ». *Review of Environmental Economics and Policy* 5 (2): 258-74.

Pindyck, Robert S. 2013. « Climate Change Policy: What Do the Models Tell Us? » *Journal of Economic Literature* 51 (3): 860-72.

Pizer, William A. 2001. « Choosing Price or Quantity Controls for Greenhouse Gases ». In: M. Toman (Ed.) *Climate Change Economics and Policy: An RFF Anthology*, Washington DC: Resources for the Future.

Pye, Steve, Christophe McGlade, Chris Bataille, Gabriel Anandarajah, Amandine Denis-Ryan, et Vladimir Potashnikov. 2016. « Exploring national decarbonization pathways and global energy trade flows: a multi-scale analysis ». *Climate Policy* 0 (0): 1-18.

Ranger, Nicola, L. K. Gohar, J. A. Lowe, S. C. B. Raper, Alex Bowen, et R. E. Ward. 2012. « Is it possible to limit global warming to no more than 1.5° C? » *Climatic change* 111 (3-4): 973-81.

Riahi, Keywan, Shilpa Rao, Volker Krey, Cheolhung Cho, Vadim Chirkov, Guenther Fischer, Georg Kindermann, Nebojsa Nakicenovic, et Peter Rafaj. 2011. « RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions ». *Climatic Change* 109 (1-2): 33-57.

Robiou du Pont, Yann, M. Louise Jeffery, Johannes Gütschow, Peter Christoff, et Malte Meinshausen. 2016. « National Contributions for Decarbonizing the World Economy in Line with the G7 Agreement ». *Environmental Research Letters* 11 (5): 54005.

- Rogelj, Joeri, Michel den Elzen, Niklas Höhne, Taryn Fransen, Hanna Fekete, Harald Winkler, Roberto Schaeffer, Fu Sha, Keywan Riahi, et Malte Meinshausen. 2016. « Paris Agreement Climate Proposals Need a Boost to Keep Warming Well below 2 °C ». *Nature* 534 (7609): 631-39.
- Rozenberg, Julie, Adrien Vogt-Schilb, et Stephane Hallegatte. 2014. « Transition to clean capital, irreversible investment and stranded assets ». *World Bank Policy Research Working Paper*, n° 6859.
- Saltelli, Andrea, Karen Chan, et E. Marian Scott. 2000. *Sensitivity analysis*. Vol. 1. Wiley New York.
- Saltelli, Andrea, Marco Ratto, Terry Andres, Francesca Campolongo, Jessica Cariboni, Debora Gatelli, Michaela Saisana, et Stefano Tarantola. 2008. *Global sensitivity analysis: the primer*. John Wiley & Sons.
- Sanderson, Benjamin M., Brian C. O'Neill, et Claudia Tebaldi. 2016. « What Would It Take to Achieve the Paris Temperature Targets?: Achieving the Paris Temperature Targets ». *Geophysical Research Letters*.
- Sandmo, Agnar. 2007. « Global Public Economics: Public Goods and Externalities ». *Économie publique/Public economics*, n° 18-19(octobre).
- Sathaye, Jayant, et P. R. Shukla. 2013. « Methods and models for costing carbon mitigation ». *Annual Review of Environment and Resources* 38: 137-68.
- Savage, Leonard J. 1954. *The foundations of statistics*. Courier Corporation.
- Schafer, Andreas. 2012. « Introducing behavioral change in transportation into energy/economy/environment models ». *World Bank Policy Research Working Paper*, n° 6234.
- Schelling, Thomas C. 1992. « Some economics of global warming ». *The American Economic Review* 82 (1): 1-14.
- Schers, Jules, Frédéric Gherzi, Franck Lecocq, et Fabio Grazi. 2015. « Green Growth and its Implications for Public Policy – The Case of South Africa ». *Etudes de l'AFD* n°4.
- Schneider, Stephen H. 2001. « What is 'dangerous' climate change? » *Nature* 411 (6833): 17-19.
- Sirkis, A., Hourcade, J.-C., Dasgupta, D., Studart, R., Gallagher, K., Perrissin-Fabert, B., da Veiga, J.E., Espagne, E., Stua, M., Aglietta, M. 2015. Moving the trillions – a debate on positive pricing of mitigation action.
- Shalizi, Z., et F. Lecocq. 2009. « Climate Change and the Economics of Targeted Mitigation in Sectors with Long-Lived Capital Stock ». *Policy Research Working Paper Series*.
- Sheeran, Kristen A. 2006. « Who Should Abate Carbon Emissions? A Note ». *Environmental and Resource Economics* 35 (2): 89-98.
- Smith, Pete, Steven J. Davis, Felix Creutzig, Sabine Fuss, Jan Minx, Benoit Gabrielle, Etsushi Kato, et al. 2016. « Biophysical and Economic Limits to Negative CO₂ Emissions ». *Nature Climate Change* 6 (1): 42-50.
- Stiglitz, Joseph, Amartya Sen, et Jean-Paul Fitoussi. 2009. « The measurement of economic performance and social progress revisited ». *The Measurement of Economic Performance and Social Progress Revisited. Commission on the Measurement of Economic Performance and Social Progress, Paris*.
- Stocker, Thomas F. 2013. « The Closing Door of Climate Targets ». *Science* 339 (6117): 280–282.
- Thomas, Brinda A., et Inês L. Azevedo. 2013. « Estimating direct and indirect rebound effects for US households with input–output analysis Part 1: Theoretical framework ». *Ecological Economics* 86: 199-210.
- Traeger, Christian P. 2014. « On option values in environmental and resource economics ». *Resource and Energy Economics* 37: 242-52.
- Tschakert, Petra. 2015. « 1.5 C or 2 C: a conduit's view from the science-policy interface at COP20 in Lima, Peru ». *Climate Change Responses* 2 (1): 1.

Ulph, Alistair, et David Ulph. 1997. « Global Warming, Irreversibility and Learning ». *The Economic Journal* 107 (442): 636-50.

Ürge-Vorsatz, Diana, Sergio Tirado Herrero, Navroz K. Dubash, et Franck Lecocq. 2014. « Measuring the co-benefits of climate change mitigation ». *Annual Review of Environment and Resources* 39: 549-82.

van den Bergh, Jeroen C. J. M. 2011. « Environment versus growth — A criticism of “degrowth” and a plea for “a-growth” ». *Ecological Economics* 70 (5): 881-90.

van der Heijden, Kees. 1996. *Scenarios: the art of strategic conversation*. John Wiley & Sons.

van der Ploeg, Rick, et Armon Rezai. 2016. « Stranded Assets, the Social Cost of Carbon, and Directed Technical Change: Macroeconomic Dynamics of Optimal Climate Policy ».

van Der Ploeg, Frederick, et Aart J. de Zeeuw. 1992. « International aspects of pollution control ». *Environmental and Resource Economics* 2 (2): 117-39.

van Ruijven, Bas J. 2016. « Mind the gap—the case for medium level emission scenarios ». *Climatic Change* (forthcoming).

van't Klooster, Susan A., et Marjolein BA van Asselt. 2006. « Practising the scenario-axes technique ». *Futures* 38 (1): 15-30.

Van Vuuren, Detlef P., Elke Stehfest, Michel GJ den Elzen, Tom Kram, Jasper van Vliet, Sebastiaan Deetman, Morna Isaac, Kees Klein Goldewijk, Andries Hof, et Angelica Mendoza Beltran. 2011. « RCP2. 6: exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2 C ». *Climatic Change* 109 (1-2): 95-116.

Van Vuuren, Detlef P., Sebastiaan Deetman, Jasper van Vliet, Maarten van den Berg, Bas J. van Ruijven, et Barbara Koelbl. 2013. « The role of negative CO₂ emissions for reaching 2 C—insights from integrated assessment modelling ». *Climatic Change* 118 (1): 15-27.

Vuuren, Detlef P. van, Elmar Kriegler, Brian C. O'Neill, Kristie L. Ebi, Keywan Riahi, Timothy R. Carter, Jae Edmonds, et al. 2014. « A New Scenario Framework for Climate Change Research: Scenario Matrix Architecture ». *Climatic Change* 122 (3): 373-86.

Weitzman, Martin L. 2011. « Fat-tailed uncertainty in the economics of catastrophic climate change ». *Review of Environmental Economics and Policy* 5 (2): 275-92.

Weitzman, Martin L. 2012. « GHG targets as insurance against catastrophic climate damages ». *Journal of Public Economic Theory* 14 (2): 221-44.

Weitzman, Martin L. 2015. « Internalizing the Climate Externality: Can a Uniform Price Commitment Help? » *Economics of Energy & Environmental Policy* 4 (2).

Yohe, Gary, Natasha Andronova, et Michael Schlesinger. 2004. « Climate. To hedge or not against an uncertain climate future? » *Science (New York, N.Y.)* 306 (5695): 416-17.

Zahavi, Y., et A. Talvitie. 1980. « Regularities in travel time and money expenditures ». *Transportation Research Record* 750.