

La modélisation comme démarche d'investigation du long terme des systèmes énergétiques

Edi Assoumou

▶ **To cite this version:**

Edi Assoumou. La modélisation comme démarche d'investigation du long terme des systèmes énergétiques. domain_sde.plan. Universite Nice Sophia Antipolis; Mines ParisTech - Ecole des mines de Paris, 2017. tel-01691601

HAL Id: tel-01691601

https://minesparis-psl.hal.science/tel-01691601

Submitted on 24 Jan 2018

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.

Université de Nice Sophia-Antipolis

Ecole Doctorale– STIC

Habilitation à Diriger des Recherches

La modélisation comme démarche d'investigation du long terme des systèmes énergétiques

Edi Assoumou

MINES ParisTech, PSL Research University,

Centre de Mathématiques Appliquées

Soutenue publiquement le 22 Juin 2017

JURY :

M. Christophe CHARLIER	Professeur Université Nice Sophia Antipolis	Président
M. Mindjid MAIZIA	Professeur Université François -Rabelais de Tours	Rapporteur
M. Frédéric LANTZ	Professeur IFP School	Rapporteur
M. Lucien WALD	Professeur Mines ParisTech	Rapporteur
M. François MIRABEL	Professeur Université de Montpellier	Examinateur
Mme. Nadia MAIZI	Professeur Mines ParisTech	Examinateur

REMERCIEMENTS

« .. les succès partiels et les réductions partielles nous enseignent beaucoup de choses, mais aussi parce que nous retirons un enseignement de nos échecs partiels et des nouveaux problèmes qui nous sont révélés par nos échecs. » Karl Popper, La logique de la découverte scientifique

Il y a dans l'activité du chercheur quelque chose qui procède du partage de micro-idées de proche en proche, d'encouragements et de motivation mutuelle. Un simple et grand merci à tous ceux qui m'ont accompagné et qui continuent de le faire avec amitié et patience dans cette aventure autant professionnelle qu'humaine !

Merci en premier lieu à tous les membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'évaluer ce mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches. Pour vos retours sur le manuscrit, nos échanges, et les discussions ouvertes que nous avons eues lors de la soutenance.

Merci à tous mes collègues du CMA, chercheurs, administratifs, informaticiens, doctorants, stagiaires et étudiants. Merci pour nos échanges sur les modèles, la prospective et au-delà sur bien d'autres sujets. Sans vous et votre bonne humeur, pas d'épanouissement possible sur le lieu de travail !

Merci enfin à ma famille, ma source et ma ressource.

TABLE DES MATIERES

PREAMBULE 9
PARTIE 1 – PARCOURS ACADEMIQUE 11
I. Curriculum vitae 13
II. Publications et communications 17
PARTIE 2 – SYNTHESE DES TRAVAUX DE RECHERCHE 27
I. Introduction 29
II. Modélisation TIMES des systèmes énergétiques et allocation optimale 35
III. Bilan de travaux de recherche portant sur l'analyse des impacts environnementaux des systèmes énergétiques par la modélisation 49
IV. Approfondir la compréhension des enjeux de transition énergétique par d'autres approches de modélisation 65
V. Perspectives de recherche 78
VI. Conclusion 81
VII. Références 82

INDEX DES FIGURES

Figure 1. Les grandes approches de modélisation des systèmes énergétiques et leurs chaînes causales 31
Figure 2. Evolution des consommations de gaz naturel pour les différents scénarios 41
Figure 3. Désagrégation temporelle retenue dans l'étude [23] 44
Figure 4. Structure de la production électrique (2050) pour une contrainte minimale de 60% d'ENR 44
Figure 5. Structure de la production électrique (2050) pour une contrainte minimale de 100% d'ENR 45
Figure 6. Système énergétique de référence synthétique du modèle bioénergie France [30] 47
Figure 7. Illustration de l'allocation des technologies pour une substitution gazole et pour différents scénarios [25] 48
Figure 8. Trajectoires de la valeur tutélaire du CO_2 à l'horizon 2050 établie par le rapport Quinet. [32] 51
Figure 9. Synthèses des valeurs du CO_2 pour la France obtenues par la valeur duale de la contrainte de réduction. [38] 53
Figure 10. Prélèvements en eau douce par habitants. Données FAO-Banque mondiale 59
Figure 11. Les composantes du nexus Eau-Energie. [53] 61
Figure 12. Topologie du Système Eau de Référence [53] 62
Figure 13. Influence de la prise en compte des besoins en eau sur l'évolution du mix électrique [53] 62
Figure 14. Approches de modelisation des besoins en eau des centrales thermiques dans des modeles times : gauche (simplifiee), droite (flexible). Source [54] 63
Figure 15. Illustration de l'allocation des systèmes de refroidissement des centrales électriques à l'horizon 2050 pour différents scénarios de division par deux des émissions de CO_2 : sans contrainte eau (Conv_50pcCO_2), avec un volume constant de consommation d'eau douce et une attribution fixe des besoins en eau des centrales (Conv_WC50pcCO_2), et avec un volume constant de consommation d'eau douce et une modélisation flexible des besoins en eau des centrales (Adv_WC50pcCO_2). [54] 64
Figure 16. Reconstitution des consommations d'énergie finale par usages, par secteur (haut) et par période de construction (bas) pour la ville de Bologne 67
Figure 17. Processus de détermination des besoins de mobilité 68
Figure 18. Subventions au véhicule tout électrique ou hybride rechargeable en 2015. Source Global EV Outlook 2016 [61] 69
Figure 19. Sous-modules du modèle EV-CAP 71
Figure 20. Profils de recharge pour une recharge lente (8A), et une recharge préférentiellement selon l'heure d'arrivée au domicile : Flat (signal prix de l'électricité indifférencié), ToD (profil de signal prix de type heure pleine/heure creuse, et RealT (profil de signal prix de type temps réel). [66] 73
Figure 21. Profils de recharge dans une configuration « vehicle to grid » et pour un signal prix de l'électricité de type heure pleine/heure creuse. [66] 73
Figure 22. Exemple d'arbre de régression pour la variable surface habitable par personne[78] 77

INDEX DES TABLEAUX

Tableau 1. Synthèse de contributions portant sur la représentation des flux énergétiques à différentes échelles 40
Tableau 2. Variation de la consommation totale de gaz naturel dans l'hypothèse pessimiste d'une industrie automobile qui ne développe pas de véhicule particulier fonctionnant au gaz naturel..... 42
Tableau 3. Description des scénarios considérés dans [26] 56
Tableau 4. Evolution des parts de marché des différentes filières de production de biocarburant : première génération (1G), lignocellulosique (LC), et troisième génération (Algae).Source [26] 58
Tableau 5. Enquêtes mobilisées et disponibilité de variables explicatives relatives aux modes de vie [78]..... 76

PREAMBULE

Je suis enseignant chercheur au Centre de Mathématiques Appliquées de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris. Au cours de ma thèse puis comme chercheur, je m'y suis intéressé à l'étude des enjeux de long terme des systèmes énergétiques. Ce champ de recherche qui m'a passionné a bénéficié de deux circonstances particulièrement favorables.

La première est que cette période d'une dizaine d'année a été exceptionnellement riche en innovations technologiques (ou en baisses significatives des coûts) ainsi qu'en interrogations sur la dimension stratégique des systèmes énergétiques. Elle s'est donc révélée propice et réceptive à l'idée un renouvellement du besoin de capacité de projection sur le long terme. En toile de fond, la dimension supra-étatique des problématiques énergétiques s'est renforcée avec d'une part des impulsions émanant de l'échelle européenne, et d'autre part une accélération (même si les résultats concrets en restent faibles) des discussions à l'échelle internationale et notamment dans le cadre des négociations climatiques. Que ce soit donc par volontarisme pur ou pour rester à la pointe de ces débats, la recherche sur les futurs possibles des systèmes énergétiques a connu en France un engouement certain. La seconde condition favorable tient dans le choix du Centre de Mathématiques Appliquées d'explorer, dès 2002, une approche de modélisation innovante pour la France. L'attrait du paradigme d'optimisation et d'une communauté dynamique a alors conduit à opter pour une modélisation des choix technologiques à partir de la famille de modèles MARKAL-TIMES. Le contexte du début des années 2000 a, il faut le rappeler, été surtout marqué par la mise en place de l'ouverture des marchés européens de l'énergie, l'accord de Kyoto et donc avec l'horizon 2010 comme principal point de mire. D'un point de vue technologique, le soutien à la cogénération et l'intérêt pour les cycles combinés à gaz concentraient l'attention. J'ai eu le privilège de participer aux développements qui ont conduit à consolider ce choix pour le centre. De ce temps passé à faire et à questionner ma pratique de chercheur, j'ai nourri l'idée que la recherche dans ce champ est, au-delà des résultats particuliers, une démarche scientifique de reformulation et de compréhension des enjeux de nos systèmes énergétiques actuels. Les modèles que nous développons en sont des facilitateurs qu'il faut dès lors maintenir ouverts aux interrogations nouvelles.

C’est dans l’exploration de l’espace complexe des problématiques énergétiques et la possibilité pour de nouveaux chercheurs d’explorer plus avant les enjeux de choix et de dynamiques de transition des systèmes énergétiques que je conçois l’accompagnement ou la direction de la recherche. J’y ai consacré du temps, directement ou indirectement, avec plusieurs doctorants et stagiaires au cours de ces années. Leur curiosité propre, leur talent et la qualité de leurs travaux me confortent dans l’utilité de cette approche. Mes collègues et l’organisation du centre y sont aussi pour beaucoup.

Ce mémoire de recherche revient plus spécifiquement sur mes activités de recherche. Il est divisé en deux parties. La première décrit mon parcours académique. La seconde propose une synthèse de mes travaux de recherche et quelques perspectives. Elle vise à illustrer, pour divers sujets, comment la modélisation et l’amélioration des modèles formels peuvent être comprises, en elles-mêmes, comme outils structurants d’une démarche d’investigation.

PARTIE 1 – PARCOURS ACADEMIQUE

I. CURRICULUM VITAE

Edi ASSOUMOU

Né le 30 Avril 1978 à Abidjan

Marié

Mob : 06 11 36 73 06
Email : edi.assoumou@mines-paristech.fr
Nationalité : Ivoirienne

Fonction : Chargé de recherche au Centre de Mathématiques Appliquées Mines ParisTech

PARCOURS PROFESSIONNEL

Depuis 1/11/2011 : Chargé de recherche au Centre de mathématiques Appliquées de Mines ParisTech

01/10/2007-31/10/2011 : Ingénieur de Recherche ARMINES / Centre de Mathématiques Appliquées de MinesParisTech

01/10/2006-30/09/2007 ; Post-doctorant, ARMINES / Centre de Mathématiques Appliquées de MinesParisTech

FORMATION ACADEMIQUE

2006 : Thèse de doctorat MINES ParisTech, spécialité Economie et Finances. Titre : Modélisation MARKAL pour la planification énergétique long terme dans le contexte français.

2002 : Mastère Spécialisé en Optimisation des Systèmes Energétiques, MINES ParisTech.

2001 : Ingénieur de l'École Nationale Supérieure d'Électrochimie et d'Électrométallurgie de Grenoble (INPG-ENSEEG). Option Energie Electrique.

Langues : Anglais, parlé, lu et écrit couramment.

PROJETS DE RECHERCHE

• 2014-2017 : Projet ANR SUD, Systèmes Urbains dynamiques, dans le cadre du programme villes et bâtiments durables.

• 2012 - 2015 : Coordinateur du projet transnational EV-STEP financé dans le cadre de l'ERANET Transport Electromobility+.

• 2011 - 2014 : Outil d'aide à la décision pour des stratégies énergétiques durables à l'échelle urbaine dans le cadre du projet CitInES (financement européen FP7).

• 2010 - 2013 : Etude prospective énergie/ville/transport dans le cadre du projet SUSTAINS (financement FUI).

• 2008 - 2010 : Modèle prospectif pour la Valorisation de la Biomasse (Modèle VALBIOM) dans le cadre du projet VALERBIO financement de de la fondation TUCK.

• 2006 - 2009 : Projets européens RES2020 et NEEDS : modélisateur pour la France.

EXPERTISE ET ETUDES PROSPECTIVES

• 2015-2016 : Prospective du contenu CO2 du kWh électrique. Etude conjointe de la chaire écoconception et de la chaire modélisation prospective au service du développement durable.

• 2015 : Etude des modalités d'intégration du Biogaz dans une modélisation prospective. GTRGAZ.

• 2013 : Expert externe pour l'élaboration du rapport « REmap 2030 – A Renewable Energy Roadmap» de l'Agence Internationale des Energies Renouvelables (IRENA).

• 2007- 20012 : Elaboration de Scénarios prospectifs pour le Centre d'Analyse Stratégique (CAS).

- Modélisation de scénarios de sortie complète ou partielle du nucléaire dans le cadre de la Commission Energies 2050 (2012) ;
- Facteur 4 dans le cadre de la Commission Energie (présidé par J. Syrota) 2008 ;
- Implications des objectifs 3X20 du paquet climat européen pour la France 2009.

• 2007 : Expert externe pour l'élaboration du rapport Energy Technology Perspective 2008 de l'Agence Internationale de l'Energie.

SUIVI DE THESES

• Paul Hugues : «Stratégies technologique et réglementaire de déploiement des filières bioénergies françaises », soutenue le 10 Mars 2015.

• Thomas Le Gallic : « Modes de vie et modélisation prospective des systèmes énergétiques», en troisième année de thèse. En cours

• Jérôme Gutierrez : « Développement d'une modélisation multi-échelles pour la prospective des systèmes électriques », deuxième année de thèse. En cours

• Rémy Doudard : «Modélisation de l'impact des options de flexibilité des systèmes énergétiques sur le long terme », première année de thèse. En cours

ENSEIGNEMENTS ET ENCADREMENT D'ETUDIANTS

• Atelier d'introduction à la modélisation prospective TIMES

- Mastère spécialisé en Optimisation des Systèmes Energétique et Cycle d'Ingénieur civil de Mines Nancy (18h)
- Cycle d'ingénieur civil Mines ParisTech(16h)
- Master DNM Ecole des Ponts (4h)
- Master Economie de l'Environnement, de l'Energie et des Transports (EEET) (12h)

• Introduction aux notions et concepts de l'économie de l'environnement

- Mastère spécialisé en Optimisation des Systèmes Energétique (3h)

• Suivi académique de missions professionnelles d'étudiants du mastère OSE : Deux à trois élèves par an depuis 2009

RESEAUX COLLABORATIFS DE RECHERCHE

2015-2016-2017 : Membre du comité scientifique de la conférence internationale, « Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems » (SDEWES).

Membre de EURO (The Association of European Operational Research Societies) :

- 2016 : 28ème conférence européenne de recherche opérationnelle, Poznan - Organisation de deux sessions
  - «Decabornizing electric systems Part I: System supply and grid»
  - «Decabornizing electric systems Part II: Demand and behavior».
- 2015 : 27ème conférence européenne de recherche opérationnelle, Glasgow - Organisation d'une session « Operational challenges of electrified mobility ».
- 2012 : 25ème conférence européenne de recherche opérationnelle, Vilnus - organisation d'une session « Smart cities and Smart grids».
- 2010 : 24ème conférence européenne de recherche opérationnelle, Lisbonne - organisation d'une session parallèle "Mathematical models for energy and environment".

Membre de la délégation ParisTech pour les conférences des parties de l'UNFCCC depuis 2009:

- COP15 Copenhague Climate Change Conference), COP16 (Cancun Climate Change Conference), COP17 (Durban Climate Change Conference), COP18 Doha Climate Change Conference), COP 19 (Warsaw Climate Change Conference), COP 20 (Lima Climate Change Conference), COP21 (Paris Climate Change Conference), COP22 (Marrakech Climate Change Conference).
- Organisation de side event, « The need and challenge of ambitious climate-energy strategies at the urban scale », UNFCCC COP20, LIMA, European Pavilion.

- Organisation de side event, « Low carbon development and energy access in Africa », UNFCCC COP17, Durban, African Pavilion.

Membres de l'IAEE (International Association for Energy Economics) jusqu'en 2016.

Participation au programme Energy Technology System analysis Program (ETSAP) de l'Agence Internationale de l'Energie.

Evaluateur dans le cadre des appels à projets de l'ANR : appels à projets 2014 et 2015.

Revue d'article pour des revues internationales : Applied Energy, Energy, Journal of Environmental Management

SEMINAIRES INVITES

- Séminaires transdisciplinaire, World Knowledge Dialogue (WKD) 2015 "Energie et société: vers un modèle durable", Villars-sur-Ollon, Suisse.
- Séminaire « Mobilité électrique en Europe et transition énergétique - L'apport de cinq recherches transnationales soutenues par la France », 15 avril 2015, Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie.
- Séminaire « Global Energy Prospects: Roadmap for Doubling Renewables in the Global Energy Mix, 29 Novembre 2013, Bruxelles, Agence Internationale des Energies Renouvelables (IRENA).
- Séminaire « Global dispatch model », 23 Janvier 2013 à l'Agence Internationale de l'Energie (AIE), Paris.
- Séminaire sur la Géoprospective, « Apports de la dimension spatiale aux recherches prospectives ? », 4-5 Avril 2011, Fort de l'Ile Sainte-Marguerite, Nice-Cannes.
- Séminaire « Coût de production des EnR », 15 Décembre 2010, pour l'ADEME Sophia-Antipolis.
- Séminaire « ETP08 Towards country level granularity », 4 Juin 2007, pour l'Agence Internationale de l'Energie, Paris.

ACTIVITES DE VULGARISATION ET CULTURE SCIENTIFIQUE

Programme MEDITES, référent scientifique, depuis 2016, structuration et innovations territoriales pour le développement de la culture scientifique et technique et l'égalité des chances

Fête de la Science dans les Alpes Maritimes

- Intervention sur le thème de l'énergie et le développement durable dans une dizaine d'établissements primaires et collèges
- Week-end des Sciences, Sophia Antipolis: 22 et 23 octobre 2016, Stand « A la découverte des énergies », 10 et 11 octobre 2015, Stand « Sur la route de COP 21 – Paris Climat 2015»

II. PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

ARTICLES DANS DES REVUES INTERNATIONALES AVEC COMITE DE LECTURE

Charlotte Roux, Patrick Schalbart, Edi Assoumou, Bruno Peuportier. Integrating climate change and energy mix scenarios in LCA of buildings and districts. *Applied Energy*, Elsevier, 2016, 184, pp. 619-629.

Vincent Krakowski, Edi Assoumou, Vincent Mazauric, Nadia Maïzi. Feasible path toward 40–100 % renewable energy shares for power supply in France by 2050: A prospective analysis. *Applied Energy*, Elsevier, 2016, 171, pp.501-522.

Paul Hugues, Edi Assoumou, Nadia Maïzi. Assessing GHG mitigation and associated cost of French biofuel sector: Insights from a TIMES model. Energy, Elsevier, 2016, 113, pp.288-300

Assoumou, E., Marmorat, J.-P., Roy, V., 2015. Investigating long-term energy and CO2 mitigation options at city scale: A technical analysis for the city of Bologna. Energy. doi:10.1016/j.energy.2015.06.123

Bouckaert, S., Assoumou, E., Selosse, S., Maïzi, N., 2014. A prospective analysis of waste heat management at power plants and water conservation issues using a global TIMES model. Energy 68, 80–91. doi:10.1016/j.energy.2014.02.008

Drouineau, M., Assoumou, E., Mazauric, V., Maïzi, N., 2015. Increasing shares of intermittent sources in Reunion Island: Impacts on the future reliability of power supply. Renew. Sustain. Energy Rev. 46, 120–128. doi:10.1016/j.rser.2015.02.024

Maïzi, N., Assoumou, E., 2014. Future prospects for nuclear power in France. Appl. Energy 136, 849–859. doi:10.1016/j.apenergy.2014.03.056

Dubreuil, A., Assoumou, E., Bouckaert, S., Selosse, S., Maïzi, N., 2013. Water modeling in an energy optimization framework – The water-scarce middle east context. Appl. Energy, Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems 101, 268–279. doi:10.1016/j.apenergy.2012.06.032

Forsell, N., Guerassimoff, G., Athanassiadis, D., Thivolle-Casat, A., Lorne, D., Millet, G., Assoumou, E., 2013. Sub-national TIMES model for analyzing future regional use of biomass and biofuels in Sweden and France. Renew. Energy 60, 415–426. doi:10.1016/j.renene.2013.05.015

Assoumou, E., Maïzi, N., 2011. Carbon value dynamics for France : A key driver to support mitigation pledges at country scale. Energy Policy 39, 4325–4336.

CONTRIBUTION À CHAPITRE D'OUVRAGE

N. Maïzi, S. Bouckaert, E. Assoumou. Long-Term Water and Energy Issues in European Power Systems. Jadwiga Ziolkowska & Jeffrey Peterson. Competition for Water Resources: Experiences and Management Approaches in the US and Europe, Elsevier, 233-251 - Chapter 2.2.7, 2016, 978-0-12-803237-4.

Kempener, R., Assoumou, E., Chiodi, A., Ciorba, U., Gaeta, M., Gielen, D., Hamasaki, H., Kanudia, A., Kober, T., Labriet, M., Maïzi, N., Ó Gallachóir, B., Saygin, D., Seixas, J., Wagner, N., Wright, E., 2015. "A Global Renewable Energy Roadmap: Comparing Energy Systems Models with IRENA's REmap 2030 Project", in Informing Energy and Climate Policies Using Energy Systems Models. Springer International Publishing, Cham, pp. 43–67.

CONFERENCES INTERNATIONALES AVEC COMITE DE LECTURE ET ACTES

1. T. Le Gallic, E. Assoumou, N. Maïzi. Investigating long-term lifestyles changes in France: a statistical and modelling approach. *22nd International Sustainable Development Research Society Conference (ISDRS 2016)*, Jul 2016, Lisbon, Portugal. 2016.

2. Edi Assoumou, Gutierrez Jerome, Rémy Doudard, Nadia Maïzi. Prospects for future changes in the hourly CO2 emission factor of electricity generation: a case study for France. *11th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems - SDEWES 2016.*, Sep 2016, Lisbon Portugal.

3. T. Le Gallic, E. Assoumou, N. Maïzi. Enhancing energy system models with a quantitative approach of future lifestyles . *Conférence SDEWES*, Sep 2016, Lisbonne Portugal. 2016.

4. A. Didelot, N. Maïzi, V. Mazauric, E. Assoumou, S. Selosse. Balancing Energy Efficiency And Fossil Fuel : The Role Of Carbon Pricing. *The 8th International Conference on Applied Energy, ICAE2016*, 2016, Beijing, China.

5. N. Maïzi, V. Mazauric, V. Krakowski, E. Assoumou, X. Li. Time reconciliation and space agregation to shed light on the plausibility of longterm low carbon pathways for power system. *IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE2016)*, Aug 2016, OSHAWA, Canada. 2016.

6. E. Assoumou, N. Maïzi, « The changing role of natural gas in the French energy transition », SDEWES2015-0374. , Proceedings of the 10th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, Sept 2015, Dubrovnik, Croatia.

7. V. Krakowski, E. Assoumou, N. Maïzi, V. Mazauric, « A prospective analysis of contrasted renewable energy penetration targets in French power system », SDEWES2015-0323., Proceedings of the 10th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, Sept 2015, Dubrovnik, Croatia.

8. E. Assoumou, J-P. Marmorat, V. Roy. « Towards long-term 2050 energy and environment strategies at city scale: an application to the city of Bologna », SDEWES2014.0346, Proceedings

of the 9th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, Sept 2014, Venice, Italy.

9. P. Hugues, E. Assoumou. « Including externalities in a techno-economic outlook on French biofuel sector », SDEWES2014-0249, Proceedings of the 9th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, Sept 2014, Venice, Italy.

10. V. Krakowski, E. Assoumou, N. Maïzi, V. Mazauric, « Long-term modelling of renewable energy integration in the case of France.», In 33rd International Energy Workshop -IEW 2014, Beijing, China, June 2014.

11. S. Selosse, S. Bouckaert, E. Assoumou, N. Maïzi, "Power system and carbon capture under climate policy: a water impact analysis with TIAM-FR", IEW, Cape Town, South Africa, June 19-21, 2012

12. S. Bouckaert, M. Drouineau, V. Mazauric, E. Assoumou, N. Maïzi, "Smart Grids and Reliability of power supply : Demand response impact on future power mixes", IEEE PowerTech conference, Towards carbon free society through smarter grids, Grenoble France, June 16-20, 2013

13. S. Postic, N. Maïzi, S. Selosse, E. Assoumou, "Energy trends in Latin America: a regional disaggregation meeting the requirements of the TIMES prospective approach", 4th ELAEE, Montevideo, Uruguay, April 8-9, 2013

14. N. Maïzi, M. Drouineau, E. Assoumou, V. Mazauric, "A TIMES model of the Reunion Island for analysing the reliability of electricity supply", IEW, Stanford, California, USA, July 5-8, 2011

15. S. Bouckaert, S. Selosse, A. Dubreuil, E. Assoumou, N. Maïzi, "Towards A Shared Optimum For Water And Energy Resources: A Focus On The Middle East Using The TIAM-FR Model", 30th International Energy Workshop (IEW), Stanford, California, USA, July 5-8, 2011

16. S. Selosse, E. Assoumou, N. Maïzi, "Climate Scenarios For Developing And Developed Countries: A Prospective Analysis With TIAM-FR", 30th International Energy Workshop (IEW), Stanford, California, USA, July 5-8, 2011

17. S. Bouckaert, S. Selosse, A. Dubreuil, E. Assoumou, N. Maïzi, "Analyzing Water Supply in Future Energy Systems Using the TIMES Integrated Assessment Model (TIAM-FR)", Proceedings of the 3rd International Symposium on Energy Engineering, Economics and Policy: EEEP, Orlando, Florida, USA, July 19-22, 2011

18. N. Forsell, L-O Eriksson, E. Assoumou, "Industrial and Environmental Impacts of an Expanding Bio-Energy Sector", Proceedings of the 3rd International Symposium on Energy Engineering, Economics and Policy: EEEP, Orlando, Florida, USA, July 19-22, 2011

19. S. Selosse, E. Assoumou, N. Maïzi, "Climate policy impact on energy system: a long-term analysis with the TIMES Integrated Assessment Model (TIAM-FR)", 3rd International Symposium on Energy Engineering, Economics and Policy: EEEP, Orlando, Florida, USA, July 19-22, 2011

20. A. Dubreuil, E. Assoumou, S. Selosse, S. Bouckaert, N. Maïzi, "Water-Energy Capital: sustainability implications through the implementation of water allocation in TIAM-FR energy

model", 6th Dubrovnik Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, UNESCO, Dubrovnik, Croatia, September 25-29, 2011

21. M. Drouineau, N. Maïzi, V. Mazauric, E. Assoumou, "Long term planning tools and reliability needs: focusing on the Reunion Island", 33rd IAEE International Conference "The Future of Energy: Global Challenges, Diverse Solutions", Rio de Janeiro, June 6-9, 2010

22. M. Drouineau, V. Mazauric, N. Maïzi, E. Assoumou, "The cost of reliability of supply in future power systems", 33rd IAEE International Conference "The Future of Energy: Global Challenges, Diverse Solutions", Rio de Janeiro, Brazil, June 6-9, 2010

23. G. Guerassimoff, E. Assoumou, N. Maïzi, "Modelling biomass for energy uses: results for France", 33rd IAEE International Conference The Future of Energy: Global Challenges, Diverse Solutions, Rio de Janeiro, Brazil, June 6-9, 2010

24. S. Selosse, E. Assoumou, N. Maïzi, "Regional impacts of the global carbon stakes: Long term prospective with the TIMES integrated assessment model (TIAM-FR)", 33rd IAEE International Conference The Future of Energy: Global Challenges, Diverse Solutions, Rio de Janeiro, Brazil, June 6-9, 2010

25. M. Drouineau, N. Maïzi, E. Assoumou, V. Mazauric, "TIMES model for the Reunion Island: addressing reliability of electricity supply", International Energy Workshop (IEW), Stockholm, Sweden, June 21-23, 2010

26. S. Selosse, E. Assoumou, N. Maïzi, "CO2 mitigation targets and technological limits: Prospective analysis with the TIMES integrated assessment model (TIAM-FR)", International Energy Workshop (IEW), Stockholm, Sweden, June 21-23, 2010

27. N. Forsell, G. Guerassimoff, D. Athanassiadis, E. Assoumou, "Sub-national TIMES model for analyzing regional future use of Biomass and Biofuels in France and Sweden", International Energy Workshop (IEW), Stockholm, Sweden, June 21-23, 2010

28. N. Maïzi, S. Selosse, E. Assoumou, "Power generation under post Copenhagen emission reduction pledges", 2nd International Conference on Engineering Optimization (ENGOPT), Lisbon, Portugal, September 6-9, 2010

29. S. Selosse, E. Assoumou, N. Maïzi, V. Mazauric, "Post-Kyoto policy implications on the energy system: A TIAM-FR long-term planning exercise", XXIe World Energy Congress, Montreal, Canada, September 12-16, 2010

30. N. Maïzi, M. Drouineau, E. Assoumou, "Flexibility and reliability in long-term planning exercices dedicated to the electricity sector", XXIe World Energy Congress, Montreal, Canada, September 12-16, 2010

31. N. Maïzi, V. Mazauric, E. Assoumou, M. Drouineau, "Long-term planning and the sustainable power system: a focus on flexibility needs and network reliability", Power Systems Conference and Exposition, Power Systems Conference and Exposition, PSCE '09. IEEE/PES, Washington, USA, March 15-18, 2009

32. J-M Cayla, N. Maïzi, C. Marchand, E. Assoumou, "Households under carbon constraints and the burden sharing issue", International Energy Workshop, Fondazione Giorgio Cini, Venice, Italy, june 17-19, 2009

33. E. Assoumou, N. Maïzi, G. Guerassimoff, M. Bordier, "Assessing Carbon Values To Achieve Strong Post Kyoto Co2 Reduction Targets For France", 31st IAEE International Conference, Istanbul, Turkey, June 18-20, 2008.

34. N. Maïzi, E. Assoumou, V. Mazauric, "Energy Efficiency And The "triple 20" European Policy: Lessons Drawn From The French Case", 31st IAEE International Conference, Istanbul, Turkey, June 18-20, 2008.

35. M. Drouineau, V. Mazauric, E. Assoumou, N. Maïzi, "Network reliability assessment towards long term planning", IEEE - Energy 2030 Conference, Atlanta, Georgia, USA, November 17-18, 2008

36. N. Maïzi, E. Assoumou, "Electricity Generation and Renewables under Carbon Mitigation Policies", IEEE - Energy 2030 Conference, Atlanta, Georgia, USA, November 17-18, 2008

37. A-S Maladin, C. Kayser-Bril, N. Maïzi, E. Assoumou, V. Boutin, V. Mazauric, "Assessing the Impact of Smart Building Techniques: a Prospective Study for France", IEEE - Energy 2030 Conference, Atlanta, Georgia, USA, November 17-18, 2008

ARTICLES DE REVUES EN FRANÇAIS AVEC COMITES DE LECTURE

---

1. Vincent Krakowski, Edi Assoumou, Nadia Maïzi. Enjeux d'une transition vers une production d'électricité 100 % renouvelable en France. *Revue de l'Energie*, 2015, pp.381-394.

2. T. Le Gallic, E. Assoumou, N. Maïzi, P. Strosser, « Les exercices de prospective énergétique à l'épreuve des mutations des modes de vie », Vertigo Vol. 14, No 3, 2014.

3. P. Hugues, J. Rousseau, E. Assoumou « Le secteur bioénergie français, Technologies et ressources pour répondre à la demande en 2050 », dans Revue de l'Energie, No 614 (juillet/août 2013), pp. 249-278, 2013.

4. N. Maïzi, E. Assoumou, « Modélisation prospective et sp´ecificit´es de la politique énergétique française », J3eA 6, (2007).

5. E. Assoumou, M. Bordier, G. Guerassimoff, C. Grange, N. Maïzi « La famille MARKAL de modèles de planification énergétique : un complément aux exercices de modélisation dans le contexte français », Revue de l´´Energie 558, Juillet – Août 2004.

COMMUNICATIONS SANS ACTES AVEC COMITES DE LECTURE

---

1. Nadia Maïzi, A. Didelot, Vincent Mazauric, Edi Assoumou, Sandrine Selosse. Impacts of fossil fuel extraction costs and carbon pricing on energy efficiency policies. *International Energy Workshop*, Jun 2016, Cork Ireland

2. Ariane Millot, Edi Assoumou, François Briens, Rémy Doudard, Thomas Le Gallic, et al.. Towards a 1.5 degre compatible energy system for France. *EURO 2016 - 28 th European*

Conference on Operational Researc - Long Term Planning in Energy, Environment and Climate, Jul 2016, Poznan, Poland. 2016.

3. E. Assoumou, R. Doudard, J. Gutierrez« Emission impacts of marginal electricity demand in France », 68th Semi-Annual IEA-ETSAP Meeting, Oct 2015, Sophia Antipolis, France.

4. E. Assoumou, J-P. Marmorat, « Load curve impact of large electric vehicles fleet in the Paris Île-de-France Region », European Conference on Operational Research, University of Strathclyde, July 2015, Glasgow, UK.

5. E. Assoumou, J. Houel, J-P. Marmorat, « Model based analysis of a massive development of electric vehicle in the Paris Ile de France Region », 14th International Association of Energy Economics, European Energy Conference, Oct 2014, Rome, Italy.

6. S. Selosse, E. Assoumou, F. Ghersi, J-C. Hourcade, J. Li, N. Maïzi, « Reconciling top-down and bottom-up energy/economy models: a case of TIAM-FR and IMACLIM-R. », ETSAP-UCC Workshop - Methodologies linking energy systems models and economic models, University College Cork, Feb 2014,Cork, Ireland.

7. E. Assoumou, V. Roy, N. Maïzi, "Shift from oil fueled cars for future sustainable mobilities", 10th IAEE European Conference Energy, Policies and Technologies for Sustainable Economies, Vienna, Austria, September 7-10, 2009

8. M. Drouineau, N. Maïzi, E. Assoumou, V. Mazauric, "Reliability in future electricity mixes: the question of distributed and renewables sources", 10th IAEE European Conference Energy, Policies and Technologies for Sustainable Economies, Vienna, Austria, September 7-10, 2009

9. G. Guerassimoff, E. Assoumou, N. Maïzi, M. Bordier, "Biomass for energy uses: assessment methodology for France", 10th IAEE European Conference Energy, Policies and Technologies for Sustainable Economies, Vienna, Austria, September 7-10, 2009

10. S. Selosse, E. Assoumou, N. Maïzi, B. Lentz, "GHG mitigation targets by 2020: what international coordination? ", 10th IAEE European Conference Energy, Policies and Technologies for Sustainable Economies, Vienna, Austria, September 7-10, 2009

11. E. Assoumou, V. Roy, N. Maïzi, "Shift from oil fueled cars for future sustainable mobilities", 10th IAEE European Conference Energy, Policies and Technologies for Sustainable Economies, Vienna, Austria, September 7-10, 2009

12. M. Drouineau, N. Maïzi, E. Assoumou, V. Mazauric, "Reliability in future electricity mixes: the question of distributed and renewables sources", 10th IAEE European Conference Energy, Policies and Technologies for Sustainable Economies, Vienna, Austria, September 7-10, 2009

13. S. Selosse, E. Assoumou, N. Maïzi, B. Lentz, "GHG mitigation targets by 2020: what international coordination? ", 10th IAEE European Conference "Energy, Policies and Technologies for Sustainable Economies", Vienna, Austria, September 7-10, 2009

14. E. Assoumou, G. Guerassimoff, S. Selosse, N. Maïzi, "ETSAP modeling tools: a bottom-up framework for energy issues", 24th European Conference on Operational Research (EURO), Lisbon, Portugal, July 11-14, 2010

15. S. Selosse, E. Assoumou, N. Maïzi, "Regional impacts of post Copenhagen emission reduction pledges using TIAM-FR", 24th European Conference on Operational Research (EURO), Lisbon, Portugal, July 11-14, 2010

16. S. Bouckaert, S. Selosse, A. Dubreuil, E. Assoumou, N. Maïzi, "Implementing water allocation in the TIAM-FR energy model", 11th IAEE European Conference, Energy Economy, Policies and Supply Security: Surviving the Global Economic Crisis, Vilnius, Lithuania, August 25-28, 2010

17. S. Selosse, E. Assoumou, N. Maïzi, "Prospective analysis of post-Copenhagen climate policy: the plausibility of investments in carbon capture and storage", 11th IAEE European Conference, Energy Economy, Policies and Supply Security: Surviving the Global Economic Crisis, Vilnius, Lithuania, August 25-28, 2010

18. A. Dubreuil, S. Bouckaert, S. Selosse, E. Assoumou and N. Maïzi, "Implementing water allocation in the TIAM-FR energy model", International Conference Water and Energy, International Water Association and Waternetwerk, Amsterdam, Netherlands, November 10-12, 2010

19. N. Forsell, L-O Ericksson, E. Assoumou, "Flexible strategic forest management in long-term energy planning", 14th Symposium for Systems Analysis in Forest Resources (SSAFR), Maitencillo, Chile, March 8-11, 2011

20. S. Selosse, E. Assoumou, N. Maïzi, "Developed and developing countries perspectives of the climate policy based on the Copenhagen Accord: A long-term analysis with TIAM-FR", 34th IAEE International Conference, Institutions, Efficiency and Evolving Energy Technologies, Stockholm, Sweden, June 19-23, 2011

21. N. Maïzi, E. Assoumou, V. Mazauric, "Future challenges for the French power generation paradigm" , 25th European Conference on Operational Research, EURO XXV, Vilnius, Lithuania, July 8-11, 2012

22. P. Hugues, E. Assoumou, N. Maïzi, "GHG emissions cap impact on French biofuel mix using MARKAL/TIMES Model" , 25th European Conference on Operational Research, EURO XXV, Vilnius, Lithuania, July 8-11, 2012

23. S. Bouckaert, E. Assoumou, N. Maïzi, "Smart grids and prospective modeling for the electricity sector", 25th European Conference on Operational Research, EURO XXV, Vilnius, Latvia, Lithuania, July 8-11, 2012

COMMUNICATIONS INVITÉES

---

1. E. Assoumou, S. Selosse. “Technology transfer challenges”, Side-Event-Combating Climate Change in Mediterranean and African Countries and in the Middle East, Un climate Change Conference 2016 - COP22/CMP12/CMA1, Nov 2016, Marrakech, Morocco.

2. E. Assoumou, « Simulating alternative 2050 urban energy strategies: a case study for the city of Bologna. », European Union Side Events - UN Climate Change Conference Dec 2014, Lima.

3. E. Assoumou, L. Gusse. « (Re)thinking the future of natural gas allocation by 2050: Opportunities in the transport sector », 20th Flame conference, Amsterdam, Netherlands, May 2014.

4. E. Assoumou, « Sustainable and greener: challenges in (re)thinking the French energy system by 2030 and 2050 », UN Climate Change Conference Nov 2013, Warsaw, European pavilion

RAPPORTS DE RECHERCHE ET RAPPORTS D'ETUDES

---

1. E. Assoumou, "Sustainable Technical and Economic Pathways for Electrified Mobility Systems in EU-27 by 2030 - Final administrative and scientific report ", Rapport final ERANET Electromobility+, Sept 2015.

2. E. Assoumou, "EV-STEP – Electromobility+ : Final project report for the French research groups", Rapport final pour la partie française au Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, Juin 2015.

3. E. Assoumou, J-P. Marmorat, J. Houël, V. Roy, « Load curve impact of electric vehicle: analysis for the Paris Ile de France area using the EV-CAP methodology », Deliverable D4.3, EV-STEP project, March 2015.

4. E. Assoumou, J-P. Marmorat, J. Houël, V. Roy, « Description of the EV-CAP methodology for charging planning load profiles evaluation of an electric vehicle fleets »», Deliverable D3.1, EV-STEP project, Feb 2015.

5. P. E. Grohnheit, C. C. Pérez, E. Assoumou, S. Postic, B. Corsat, M. Blesl « Existing policies and mobility flows analysis », Deliverable D2.1, EV-STEP project, Feb 2015.

6. E. Assoumou, J-P. Marmorat, V. Roy, N. Maïzi, F. Tutino, S. Buroli, N. P. Garcia, F. Cetin, « Advanced sustainable energy strategies for the three end-users », Project CitInES Deliverable 3.3.

7. O. Pol, E. Assoumou, D. Basciotti, F. Calderoni, F. Çetin, G. Croce, N. Fidalgo, L. Fournié, S. Morigi, S. Mouret, Ç. Savaşan, « Needs of the end users », Project CitInES Deliverable 1.2.

8. Edi Assoumou, F. Briens, V. Roy, M. Bordier, « Modèles de consommation énergétique des systèmes de transport étudiés dans le SP3 », Livrable 2.2 projet SUSTAINS.

9. N. Maïzi. E. Assoumou, "Scénarios prospectifs France à l'horizon 2050", Working Paper n°2012-02-05, Les Cahiers de la Chaire, 2012.

10. E. Assoumou, N. Maïzi, "Analysis of the effect of environmental policies on the allocation of natural gas accross end-use sectors in France", Working paper n°2011-02-02, Les Cahiers de la Chaire, 2011.

11. N. Maïzi, E. Assoumou, « Scénarios prospectifs France à l'horizon 2050 », Rapport à la commission Besson Energie 2050, Décembre 2011.

12. M. Bossy, N. Maïzi, O. Pourtallier, L. Violeau, E. Assoumou, "Carbon pricing in the European carbon market context ; An indifference pricing approach", Rapport de recherches, convention ADEME N0805 C 0098, F´evrier 2011.

13. Améliorations de la modélisation Markal du secteur de l'électricité, E. Assoumou, M. Bordier, G. Guerassimoff, N. Maïzi, Rapport pour le Conseil Scientifique du Conseil Français de l'Energie, Aout 2005.

14. Modélisation Markal électrique Europe : avancement, E. Assoumou, M. Bordier, G.Guerassimoff, N. Maïzi, Rapport pour le Conseil Scientifique du Conseil Français de l'Energie, Aout 2005.

15. Enjeux environnementaux et planification énergétique européenne, N. Maïzi, M. Bordier, E. Assoumou, G. Guerassimoff, Rapport pour le Conseil Scientifique du Conseil Français de l'Energie, F´evrier 2004.

COMMUNICATIONS NATIONALES

---

1. T. Le Gallic, E. Assoumou, « Les exercices de prospective énergétique à l'épreuve des mutations des modes de vie », présentation invitée, réseau de prospective PROSPER, 14 Octobre 2015.
2. T. Le Gallic, E. Assoumou, « Energie, mode de vie et modélisation prospective : une approche quantitative », colloque sciences sociales et transition énergétiques, Grenoble, Mai 2015.

3. E. Assoumou, « Approche prospective pour la modélisation urbaine », Journée Smart cities et prospective : une contribution à RIO+20, Schneider Electric, Rueil-Malmaison, 4 Juin 2012.

4. N. Maïzi, E. Assoumou, MARKAL/Times-France : résultats des exercices prospectifs. Conseil d'Analyse Stratégique (6 interventions en 2007, 2 en 2009).

5. E. Assoumou, G. Guerassimoff, "Ressources agricoles, biocarburants et modélisation prospective TIMES", Journée de la Chaire Modélisation prospective au service du développement durable, Ecole des Ponts ParisTech, Marne-la-Vallée, 20 Novembre 2009

6. N. Maïzi, E. Assoumou, Restitution des exercices de prospective France réalisés pour le CAS. Journées ADEME Prospective Bâtiment, 18 Janvier 2008.

7. N. Maïzi, E. Assoumou, M. Bordier, G. Guerassimoff, Une approche prospective utilisant le modèle MARKAL, Forum Interminist´eriel sur la Prospective : Mars 2007.

8. Nadia Maïzi, Edi Assoumou, « Exercices prospectifs via le modèle MARKAL : spécificité françaises ? », Energie et développement durable, JEEA, Rennes, Mars 2007.

9. Edi Assoumou, Gilles Guerassimoff, Nadia Maïzi, Marc Bordier, « Etudes de sensibilité pour la prospective électrique française laide du Modèle MARKAL » , 4ème colloque MONDER, Martigny (Suisse), 8-11 Janvier 2006.

10. N. Maïzi, E. Assoumou, M. Bordier, G. Guerassimoff, ” Prospective énergétique : Le modèle MARKAL”, présentation à la Direction Générale de l’Energie et des Matières Premières, DGEMP, 16 Mai 2005.

11. E. Assoumou, N. Maïzi, M. Bordier, G. Guerassimoff, Energies renouvelables et modélisation Markal, Workshop CREDEN/EMP ” La promotion de l’électricité verte”, Ecole des Mines de Paris, Juin 2004.

PARTIE 2 – SYNTHESE DES TRAVAUX DE RECHERCHE

I. INTRODUCTION

Cette section de mon mémoire propose une synthèse des préoccupations qui ont guidé ma recherche au cours de ces dix dernières années d'abord comme post-doctorant puis comme enseignant chercheur au Centre de Mathématiques Appliquées de Mines ParisTech. Mes travaux portent sur l'étude des processus de transitions technologiques dans les systèmes énergétiques, sur leur formalisation dans des modèles et sur l'analyse des conditions de l'articulation sur le long terme des choix technologiques. La problématique plus générale à laquelle ils se rattachent est celle des rapports complexes entre des innovations techniques prises isolément et les propriétés des systèmes résultant de l'interaction des différentes options disponibles. Il en découle deux motivations profondes de ma démarche de chercheur : la compréhension des solutions technologiques individuelles et l'intérêt plus macroscopique pour la capacité d'adaptation à diverses conditions qui en résulte dans un fonctionnement en système. Ce bilan me permet aussi de revenir sur l'étendue des problématiques connexes aux systèmes énergétiques et ma vision des travaux qui restent à mener. Que ce soit pour les travaux passés ou mes perspectives de recherche j'essaierai en définitive de défendre en l'illustrant, l'idée d'un usage de la modélisation comme démarche d'investigation et d'analyse de systèmes relativement complexes pour lesquels l'expertise seule ne suffit plus. Cela est d'autant plus vrai lorsque la question de l'organisation future de ces systèmes sur des horizons de plusieurs décennies est posée. Pour situer la modélisation dans son contexte plus général, je rappelle brièvement dans cette introduction le rôle des modèles dans la perception des problématiques énergie-climat, l'enjeu des innovations technologiques, et quelques éléments de la critique des modèles.

La modélisation numérique a joué un rôle important dans la capacité à analyser la portée systémique des choix énergétiques. L'approfondissement de la compréhension des implications économiques, stratégiques ou environnementales de nos choix énergétiques dérive d'un processus qui s'est étalé sur plusieurs décennies. Il implique essentiellement le dépassement d'une vision focalisées sur des choix techniques isolées pour chaque secteur afin d'envisager, dans une perspective plus systémique, les interactions entre différents niveaux de décision et les impacts plus ou moins immédiats de ces choix dans l'espace et dans le temps. Les modèles vont alors permettre, grâce au développement concomitant de la recherche opérationnelle et des capacités de calcul, cette extension de la perspective. Pour la problématique énergie-climat , les principaux actes en sont: la publication du rapport « Limits to Growth » par le Club de Rome à l'orée de la première crise pétrolière ; les débats qui s'en sont suivis et l'éclosion de modèles alternatifs dans diverses institutions ; le rapport Brundtland de 1987 qui fixe l'acception moderne du concept de développement durable ; le sommet de la terre à Rio ; et enfin, l'institutionnalisation du discours scientifique à destination du politique à travers l'établissement du GIEC (la périodicité de ses rapports et le cycle onusien des conférences des parties). En premier lieu se développent des représentations formelles des grands équilibres mondiaux à travers des modèles numériques ainsi que la projection de ces équilibres sur le plus

long terme. Parallèlement et progressivement, la plupart des pays dont la France vont aussi y faire écho par la publication de rapports, de scénarios, de mesures et d'objectifs de long terme particuliers. L'enjeu est de comprendre, en manipulant des modèles, les implications de choix collectifs en matière d'énergie et d'alimenter des stratégies de long terme définies pour des échelles territoriales variées. A titre d'exemple, le cinquième rapport du GIEC a mobilisé 31 modèles mondiaux et environ 1000 scénarios, pour la définition de ses trajectoires globales d'émissions à l'horizon 2100.

Les principales étapes de la chaine causale que les modèles tentent de capturer sont schématisées dans la Figure 1. On peut y distinguer en premier des champs disciplinaires quasiment autonomes. Ingénieurs, économistes ou climatologues vont en effet développer une multitude de modèles permettant de rendre compte de relations formelles entre les activités humaines, la consommation d'énergie, l'évolution des émissions de gaz à effet de serre, et l'évolution de variables climatiques globales. La nomenclature des modèles distingue classiquement les modèles de systèmes énergétiques en trois grandes approches:

- les approches dites ascendantes ou bottom-up qui mettent l'accent sur la représentation de l'univers technique disponible. Plutôt développées par les ingénieurs, elles proposent une reconstitution des flux globaux (énergie, émissions) par agrégation de flux unitaires à l'échelle des procédés ;
- les approches dites descendantes ou top-down pour qui le système énergétique découle de la structure des activités et des mécanismes économiques. Plutôt macro-économiques, elles déduisent les besoins d'énergie finale pour les différents secteurs d'activité d'indicateurs macroscopiques agrégés (PIB, taux d'emploi, élasticités prix) ;
- les approches dites intégrées qui mettent en avant une vision transversale de toutes les étapes en les intégrant dans un même formalisme. La contrepartie naturelle de cette ambition est alors que ces modèles reposent sur des formes fonctionnelles beaucoup plus simplifiées. Par construction, leur échelle d'application est mondiale.

La Figure 1 montre aussi les objets communs d'étude et les interactions entre les différentes approches de modélisation. Ce sont d'une part les bilans en termes de demande d'énergie finale et d'émissions de polluants, et d'autre part les rétroactions qui traduisent l'impact des modifications des variables climatiques sur le contexte économique ou l'univers des options technologiques. Les lignes de rétroaction en pointillés rappellent cependant que l'intégration reste en pratique frustre. Sa forme la plus courante est l'utilisation de cibles d'émission de gaz à effet de serre issues des modèles climatiques dans les autres approches, ou l'utilisation de courbes de dommages stylisées (reliant des émissions cumulées à une variation de température moyenne ou une valeur économique du dommage associé). Enfin on peut y voir (Figure 1), en négatif, deux thématiques complexes et peu traitées de front par des modèles numériques : les enjeux d'adaptation au changement climatique et ceux liés à la représentation de l'évolution des bases sociétales et des organisations collectives sous-jacentes à nos demandes en énergie.

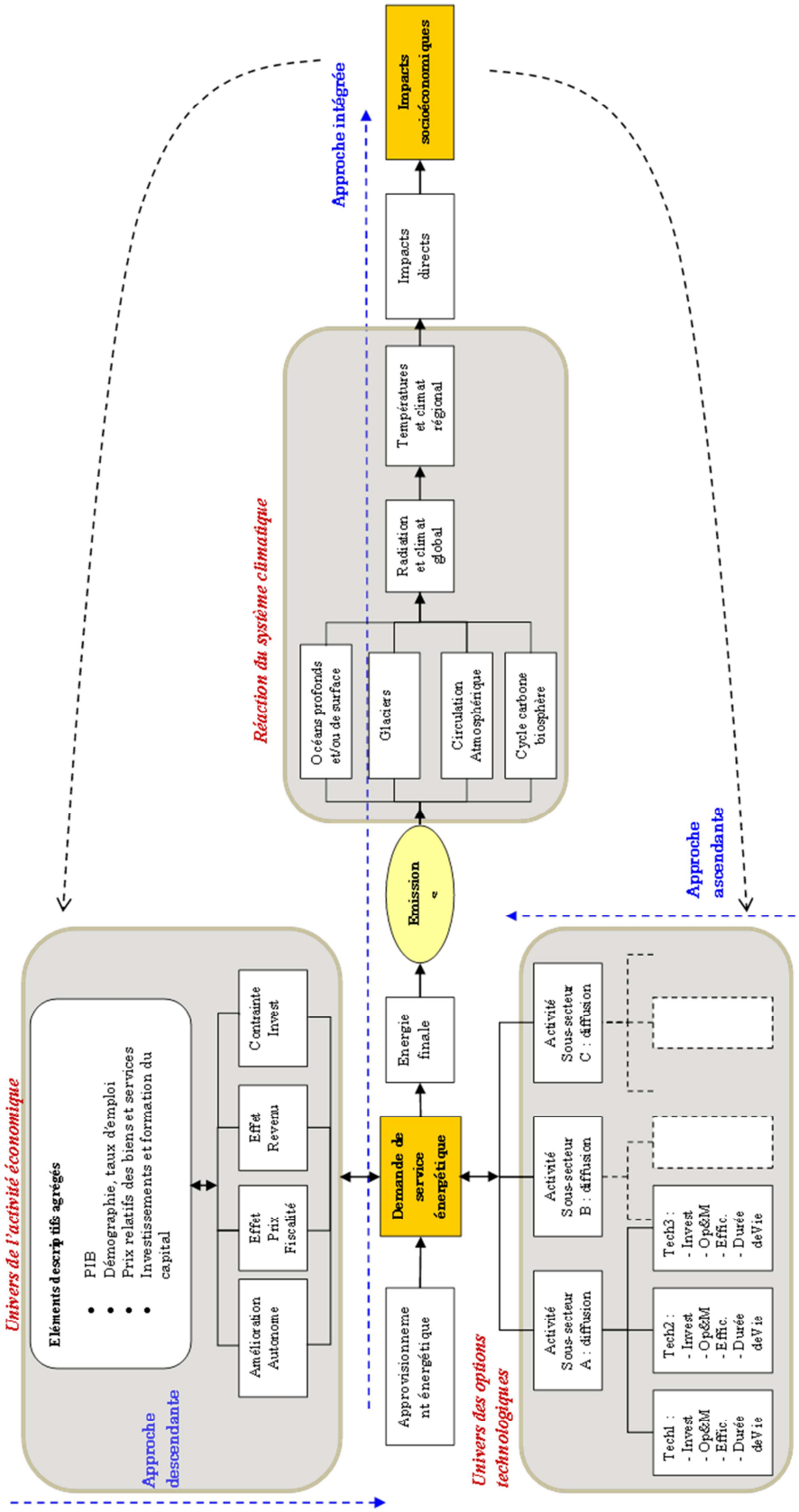


Figure 1. Les grandes approches de modélisation des systèmes énergétiques et leurs chaînes causales

Le modèle absolu qui répondrait à toutes les préoccupations avec le niveau de détail idoine n'existe pas ! Pour éclairer les politiques énergétiques et environnementales actuelles, la recherche sur les modèles va alors s'attacher à l'amélioration intrinsèque des modèles à l'intérieur d'une communauté de pratique (vers une plus grande complexité des relations), à l'hybridation plus ou moins forte de modèles (augmentation des objets communs d'étude et des « zones de contact » entre disciplines), et une meilleur prise en compte des rétroactions des systèmes climatiques ou de la dimension sociétale des besoins en énergie (vers de nouvelles relations formelles à expliciter). C'est dans cette dynamique que les modèles peuvent continuer à permettre un approfondissement de la compréhension des enjeux multiples des transitions énergétiques souhaitées aujourd'hui.

Dans la revue de la littérature qu'ils proposent, Pfenninger et ses coauteurs identifient quatre grands challenges [1] plus spécifiques auxquels fait face le champ de la modélisation des systèmes énergétiques : le degré de résolution spatiale et temporelle, la prise en compte des incertitudes et un accès plus complet aux hypothèses et données de base, la complexité[1] des échelles et des phénomènes impliqués, et la prise en compte des comportements et des facteurs sociaux. C'est là une grille de lecture utile pour appréhender les défis des modèles et les thématiques orphelines qui constituent autant d'enjeux de recherche future.

Les innovations technologiques comme moteurs des ruptures. Le second rappel proposé dans cette introduction concerne le rôle du progrès technologique sur le long terme. Si l'on se limite à notre objet d'étude qui est l'énergie, il est d'usage de remonter à la traction animale comme archétype de domestication de l'énergie et forme ancienne de rupture. De même en se concentrant uniquement sur le dernier siècle, la capacité des inventeurs et ingénieurs multiples à dépasser les contraintes particulières auxquelles faisaient face leurs sociétés et à transformer par-là ces sociétés est manifeste. L'innovation implique une diversification des voies possibles de transformations. Pour l'énergie elle se décline clairement dans la diversité des systèmes énergétiques nationaux ainsi que dans la multiplicité des technologies de production et d'utilisation finale de l'énergie dans des secteurs variés.

Dans cette vision d'une inventivité qui se déploie dans le « cours de l'histoire », les questions pragmatiques et chaque fois (re)contextualisées que se posent les décideurs pour les systèmes énergétiques sont : la disponibilité en quantité suffisante d'énergie, le coût d'accès à cette énergie, et ses impacts. Les deux premières, la sécurité d'approvisionnement et la facture énergétique, ont longtemps constitué le baromètre principal des politiques énergétiques. Les innovations que représentaient le couple produits pétroliers/automobile d'une part et le nucléaire civil pour la production d'électricité d'autre part ont ainsi été favorisées, en leur temps, par des Etats forts. Aujourd'hui, porté par l'ambition d'une limitation drastique des émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique, l'impact environnemental qui a

[1] Pour les auteurs, la complexité se différencie du choix d'un niveau de désagrégation temporelle ou spatiale en ce qu'elle concerne l'interaction des décisions entre les différentes échelles du problème (échelles des phénomènes instantanés, planification journalière à pluriannuelle, échelle des agents).

longtemps été le parent pauvre des politiques énergétiques est central et apparait même comme le principal moteur des changements technologiques à moyen et long terme.

Le progrès technologique constitue aussi un des principaux leviers des modèles numériques de systèmes énergétiques dont le paradigme implicite reste la « rectification » des choix technologiques ou des structures économiques de production de biens et services ayant conduit à l'émergence de systèmes énergétiques non soutenables. Les principes de sa représentation varient cependant avec le type de modèles. Pour les modèles à dominantes macroéconomiques (d'équilibre général ou modèles économétriques), la description du progrès technologique passe par la substituabilité entre capital, énergie et travail dans la fonction de production de chaque branche d'activité. Cette substituabilité est communément exogène et spécifiée par des coefficients d'élasticité de substitution maintenus constants dans le temps. Le calibrage de ces élasticités [2] [3] [4] et l'amélioration de la représentation de cette substituabilité est l'un des enjeux des modèles macroéconomiques. Diverses solutions sont proposées pour un traitement alternatif du progrès technique. Dans le modèle NEMESIS [5] [6] une variable globale décrivant un stock abstrait de connaissances est introduite comme facteur agrégée d'amélioration de la productivité des autres inputs. Elle est liée aux investissements dans la R&D. Le modèle IMACLIM propose quant à lui une estimation des possibilités de substitutions par le biais d'un module technologique simplifiée [7]. Le sous-module technologique vise ici l'intégration d'éléments techniques plus explicites dans une approche macroéconomique. Mes travaux de recherche portent sur une modélisation bottom-up des systèmes énergétiques. Dans cette vision bottom-up chaque innovation technologique (pompes à chaleur, véhicules électriques, capture et séquestration de CO_2 …) est, comme l'illustreront les différentes sections, individualisée. Le progrès technologique y est de fait plus explicite et l'innovation joue un rôle central. L'intérêt de cette approche se justifie notamment lorsque l'analyse reste proche de l'ingénierie et vise à identifier la contribution d'innovations particulières à l'atteinte d'objectifs divers. C'est un aspect transversal du bilan de mes travaux de recherche. En contrepartie l'étude fine de la macroéconomie reste en dehors du périmètre des travaux présentés.

Une critique féconde du paradigme techniciste des modèles. Les modèles sont des constructions qui, comme énoncé précédemment, mettent l'accent sur les éléments quantifiables avec une confiance plus ou moins marquées dans le progrès technologique comme pourvoyeur de solutions sectorielles adaptées. Plusieurs auteurs vont cependant formuler, à partir des apports des sciences humaines et sociales, de fortes réserves dirigées moins à l'encontre des modèles eux-mêmes que de leur surreprésentation dans le débat et de la distorsion qu'ils induisent dans la manière de penser le problème de la soutenabilité. Nous en proposons ici quelques éléments.

Ravetz [8] [9] conceptualise le rôle d'une critique dont la tâche est de montrer les limites des méthodes scientifiques (« to show that not all problems with a scientific appearance are capable of solution in orthodox scientific terms » [9]) comme étalon principal pour des problèmes « trans-scientifiques ». O'lear [10] critique plus particulièrement le processus du GIEC dans

l'usage de la science (entendu ici dans le sens restrictif des multiples modèles mobilisés) pour soutenir un discours sélectif contrôlé par le politique[2] et qu'elle identifie comme « prédéterminé par les positions rigides des acteurs les plus puissants [3]». Le paradigme d'une résolution des problèmes posés par l'innovation est de fait perçu comme typique d'une technoscience [11] qui crée aussi bien des faits que les formes sociales qui les acceptent par militantisme. Ces critiques qui étendent beaucoup plus loin l'espace dans l'angle-mort de nos modèles rappellent utilement cet écueil du militantisme et le besoin de se laisser interpeller hors des frontières disciplinaires.

La modélisation comme méthode d'investigation. Quelle idée-force retenir de cette introduction? Principalement celle que la modélisation des transitions de long terme dans les systèmes énergétiques est un domaine d'application de méthodes mathématiques et de recherche stimulant qui, au-delà des résultats d'analyse particuliers, procède d'une démarche d'investigation sur des sujets complexes. Il est aussi important de rappeler que ma recherche, a une portée limitée au regard du grand problème sociétal sous-jacent qu'est la nature des trajectoires futures possibles pour nos systèmes énergétiques: la perspective que j'adopte est plutôt techniciste (biais vers les conditions techniques des systèmes) et quantitative. C'est de là que j'essaie d'intégrer en les interrogeant les autres dimensions du problème dans une démarche d'amélioration des modèles et dans l'analyse des résultats.

Dorfaman, Samuelson et Solow, parlant de la programmation linéaire, posaient déjà la question de la simplicité apparente du formalisme d'un modèle en 1958 : « Can economic problems be cast in this strict format without doing them mortal violence ? » [12]. La réponse qu'ils proposent reste pertinente pour nous aujourd'hui : « Strict descriptive faithfulness is an unreasonable demand to make to any conceptualization … What we have the right to ask a conceptual model is that it seize on the strategic relationships that control the phenomenon it describes and that it thereby permit us to manipulate, i.e., think about, the situation ». Elle montre bien cette double orientation : vers l'approfondissement du jeu d'équations pour saisir ces « relations stratégiques », et vers la l'analyse et l'éclairage d'une « situation » particulière comme résultat concret.

Ce bilan décrit les grandes lignes de ma démarche de recherche à travers trois grilles : décrire les flux énergétiques, rendre compte des externalités, mobiliser au besoin des approches de modélisation complémentaires. La première section revient sur des travaux qui traitent plus directement de l'allocation des différentes formes d'énergie et la construction de modèles technologiques à cette fin. Dans la seconde, des études relatives aux impacts environnementaux et la prise en compte de diverses externalités seront présentées pour montrer comment la modélisation des systèmes énergétiques peut interagir avec les problématiques originales que soulève la dimension des externalités. La troisième section présentera ensuite des activités de modélisation portant sur des dimensions du problème qui ont motivé l'élaboration de modèles spécifiques. Enfin, la dernière section décrit des perspectives de recherche à moyen terme.

---

[2] Notamment le droit de veto des pays sur certains contenus.
[3] En particulier le biais d'instrumentalisation pour une stabilisation des rapports de force géopolitiques

II. MODELISATION TIMES DES SYSTEMES ENERGETIQUES ET ALLOCATION OPTIMALE

L'approche de modélisation de type MARKAL-TIMES est particulièrement adaptée à l'analyse explicite du rôle des technologies dans la transformation de systèmes énergétiques. Elle décrit la sélection des technologies les plus adaptées comme un problème d'allocation optimale posé dans une vision systémique. Après en avoir rappelé les principes, un bilan de mes activités de recherche portant sur des modèles élaborés sur différents périmètre sera effectué.

2.1 PRINCIPES DE LA MODELISATION TIMES

La publication du rapport du Club de Rome en 1972 et le rôle central qu'y a joué le modèle WORLD vont susciter en retour le développement d'une diversité de modèles. C'est ce contexte propice à la démarche prospective qui voit en particulier le développement de la famille de modèles MARKAL (MARKet ALlocation) sous l'égide de l'Agence Internationale de l'Energie au début des années 80 afin d'examiner l'impact sur le long terme des choix technologiques dans le secteur de l'énergie. Son développement se poursuit aujourd'hui dans le cadre d'un programme cadre de l'AIE, l'ETSAP (Energy Technology Systems Analysis Programme). Le modèle TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System) dont il est ici question en constitue l'évolution la plus récente.

La base conceptuelle de TIMES est son appréhension des systèmes énergétiques comme architecture linéaire. Au sens de TIMES, un système énergétique est essentiellement une structure linéaire dont les technologies et les flux de commodités qu'elles peuvent échanger constituent les objets élémentaires. Toute technologie y représente un processus singulier de transformation qui va pouvoir être décrit explicitement par des caractéristiques technico-économiques (efficacité relative à l'utilisation de chacune de ses entrées pour produire une unité de sortie donnée, coûts d'investissement, d'opération et de maintenance, date de première disponibilité, coefficients d'émissions pour chaque polluant considéré) ; et par des contraintes de fonctionnement (disponibilité saisonnière, limite sur les capacités installées ou sur les quantités produites…). L'articulation de technologies et de commodités dans le modèle, les sorties des unes servant d'entrée aux autres, définit un maillage et une topologie des combinaisons possibles dont les technologies sont les nœuds et les vecteurs énergétiques, les liaisons. C'est ce mécanisme qui permet de modéliser des interactions systémiques complexes bien que décrites à partir d'un fonctionnement linéaire et simple de chaque unité technologique de base.

Dans les systèmes énergétiques réels, le nombre de combinaisons potentielles de ressources primaires, de filières de transformation de ces ressources en énergie finale et d'équipements dans les secteurs d'utilisation est généralement considérable. Sur un horizon de plusieurs décennies, la durée de vie des équipements va de surcroît induire un couplage fort entre les choix d'investissement et d'opérations faits à chaque période. Le catalogue des choix technologiques et des niveaux de production ou de consommation des commodités dans un

modèle MARKAL définit ainsi une topologie qui couvre un univers des combinaisons possibles très large.

Le paradigme d'optimisation comme critère de choix. La sélection, au sens du modèle, d'une solution va alors se faire par la minimisation d'un critère : le coût total actualisé du système linéaire décrit par la topologie du modèle d'intérêt. L'intuition en est donnée ci-dessous :

$$Obj = \sum_{\substack{y \in years \\ c \in Commodities \\ p \in Processes}} \frac{AnnCost(y,c,p)}{(1+disc(p))^{y-startyear}}$$

Où

$$AnnCost(y,c,p) = \sum_{\substack{y \in years \\ c \in Commodities \\ p \in Processes}} InvCost(y,p) + FixCost(y,p) + VarCost(y,p) + TaxSub(y,p,c) + ElasCost(y,c) + CostDecom(y,p) - Salvage(y,p)$$

Avec

$disc(p)$, le taux d'actualisation éventuellement différentié pour chaque procédé ;

$InvCost(y,p)$, les coûts d'investissement pour chaque procédé et chaque période ;

$FixCost(y,p)$, les coûts fixes d'opération et maintenance selon la capacité installée ;

$VarCost(y,p)$, les coûts variables d'opération et maintenance selon la capacité installée ;

$TaxSub(y,p,c)$, les pénalités et subventions correspondantes à la production d'une commodité ou à l'investissement dans un procédé donné ;

$ElasCost(y,c)$, le coût associé à l'ajustement élastique de la demande ;

$CostDecom(y,p)$, le coût de démantèlement ;

$Salvage(y,p)$, la valeur résiduelle des investissements qui demeurent opérationnels à la fin de l'horizon.

La fonction objectif de TIMES représente la valeur actuelle nette de l'ensemble des coûts des procédés et des commodités mobilisés sur tout l'horizon[4] de simulation pour satisfaire la demande et respecter les contraintes imposées. Les variables de décisions du modèle sont :

[4] Dans un mode de résolution myope, l'horizon de simulation est décomposé en plusieurs sous horizons consécutifs. Les sous problèmes d'optimisation sont alors résolus en connaissance parfaite sur chacun des horizons restreints, la topologie finale des premiers servants de contrainte initiale aux suivants.

- Pour chaque technologie et chaque pas de temps : les investissements en capacités nouvelles, la capacité totale et le niveau d'activité. Les décisions d'investissement et d'opération sont ainsi découplées. Ceci autorise, à capacité installée donnée, une flexibilité de la production dans le temps pour répondre à diverses contraintes ;
- Pour chaque commodité et à chaque période : le niveau des flux entrants ou sortants (PJ) dans chacun des procédés ;
- Pour chaque demande de service utile : l'ajustement à la hausse ou à la baisse à chaque pas de temps sous l'effet de son élasticité prix[5].

Les contraintes d'un modèle TIMES sont de trois grands types. Elles visent tout d'abord à assurer la cohérence des flux dans le modèle. C'est le cas des contraintes de satisfaction de la demande qui imposent que le dimensionnement du système permette de satisfaire dynamiquement les besoins définis pour chacun des services modélisés. Il s'agit plus généralement pour toutes les commodités du système, de contraintes d'équilibre des flux qui assurent que pour chaque vecteur et pour chaque période, la somme des quantités produites soit supérieure ou égale à la somme des quantités consommées. A l'échelle des technologies il s'agit, pour chaque pas de temps, des contraintes qui lient les flux entrants ou sortants de chaque procédé (respect des rendements) et qui bornent les niveaux d'activité maximale par les capacités disponibles.

Un second groupe de contraintes garantit la cohérence pluriannuelle des bilans dans le modèle. Ce sont les contraintes de disponibilité cumulée des ressources qui permettent de décrire des stocks, et les contraintes de transfert de capacité des technologies qui traduisent l'inertie des choix. Ces dernières décrivent la capacité totale disponible à toute période comme la somme de la capacité résiduelle (en tenant compte de la durée de vie des technologies) des périodes antérieures et des décisions d'investissement de la période courante.

Enfin le dernier type de contraintes est optionnel. Il permet de refléter des spécifications additionnelles qui traduisent par exemple des rythmes de développement, des objectifs de réduction, ou des niveaux de subvention applicables à tout ou partie du système. Ces contraintes sont centrales à l'analyse prospective afin de spécifier, pour une topologie linéaire donnée (le cœur du modèle), les contextes particuliers de chacun des scénarios étudiés.

Que sont les apports et l'applicabilité de cette logique ? Ces principes fondent la logique d'allocation optimale des technologies de TIMES : à l'optimum, les variables de décision non nulles, caractérisent complétement les choix d'investissement et d'opération parmi l'ensemble des options possibles. C'est donc une vue qu'on peut qualifier d'ingénieur et qui rend peu compte, dans sa formulation de base, des aspects sociaux des systèmes techniques. Le paradigme d'optimisation implique aussi une rationalité très forte des décisions. L'apport des modèles de type MARKAL-TIMES réside néanmoins dans ces partis pris et ce formalisme qui

[5] Pour préserver la linéarité du modèle, les variations de demandes sont linéarisées par morceaux.

décrit une situation idéale[6]. TIMES permet en retour une description explicite et fine du contenu du progrès technique ainsi que de ses possibilités d'évolution dans le temps. L'innovation n'est pas agrégée dans des indicateurs composites à l'échelle de secteurs macroscopiques. Cette propriété permet d'adresser sans trop les dégrader, les enjeux techniques des multiples innovations incrémentales promues (biocarburant de drivers générations, intermittence, stockage, pompes à chaleurs…).

Enfin, parce qu'ils combinent une topologie techniquement détaillée et une rationalité économique très affirmée les modèles TIMES donnent une vision optimiste des capacités d'ajustement des systèmes modélisés. Ainsi les solutions optimales fournies par ce type de modèle ne sont pas des injonctions mais des solutions candidates à des tests d'adoption ou de faisabilité sociétale ou politiques. C'est une borne inférieure de coûts utiles à l'analyse des systèmes énergétiques. Enfin la généralité de ses principes permet l'application à des systèmes de différents niveaux de granularité : plusieurs régions du monde, un pays, une échelle urbaine, ou limité à un secteur d'utilisation finale donné.

2.2 PLANIFICATION ET COMPLEXITE

La profusion de textes[7] d'orientation en matière d'énergie visant à façonner le système énergétique français sur les décennies à venir rappelle en premier un fait simple : la transition d'un système énergétique aussi large et diversifié que le système énergétique français ne va pas de soi et nécessite une planification. Cette planification a été historiquement centralisée et a constitué une prérogative de l'Etat qui possédait simultanément les moyens de contrôle directs des entreprises.

L'histoire récente rappelle ainsi que les paradigmes dominants de la politique énergétique ont largement évolué sur les 60 dernières années. Aux besoins de reconstruction d'après-guerre va correspondre l'établissement de monopoles étatiques puissants pour l'énergie et l'essor du charbon et de l'hydroélectricité dans les années 50 [13]. L'indépendance énergétique, dans la décennie qui suit, va être relâchée sous les effets conjugués d'une croissance économique forte, d'une limitation des réserves de charbon françaises, d'un pétrole bon marché et du développement rapide des transports [14] [15]. Dans ce contexte d'augmentation rapide du taux de dépendance énergétique de 25 à 75 % en 10 ans [13], la crise pétrolière de 1973 remet à l'ordre du jour cet enjeu, favorise le développement rapide du parc nucléaire [16] et porte l'idée d'efficacité énergétique matérialisée par la création, au début des années 80, de plusieurs

[6] La possibilité de définir des contraintes additionnelles portant par exemple sur les rythmes de diffusion, ou un niveau de désagrégation poussé permettent de modérer ce constat.

[7] Pour la France, cela s'est traduit par une activité législative et réglementaire intense qui, sur l'enjeu climatique, comprend le PNLCC (programme national de lutte contre le changement climatique) publié en 2000 et orienté vers la mise en œuvre du protocole de Kyoto ; les comités opérationnels du Grenelle de l'environnement, le débat national, la loi relative à la transition énergétique (et pour la croissance verte), la Programmation Pluriannuelle de l'Energie à l'horizon 2023, et l'accord de Paris qui définissent tous des éléments de cadrage de l'action publique en matière de politique énergétique.

agences (AQA, AFEME, ANRED) devenues après fusion l'ADEME. Les deux décennies qui vont suivre seront quant à elles marquées par la construction européenne, la libéralisation des marchés de l'énergie et une reconnaissance progressive de la problématique des émissions de gaz à effet de serre toutefois non vraiment prises en compte dans les priorités de l'Etat.

La planification énergétique n'est pas une nouveauté. Les questions posées aujourd'hui s'inscrivent cependant dans un contexte marqué pour la France par : des moyens de contrôle et d'action de la puissance publique réduits, une phase de croissance moins soutenue de la demande d'énergie et d'électricité qui semble atteindre un palier, des débats vifs sur le futur du nucléaire en France, des enjeux qui se réfèrent à un horizon de plus long terme à 2050 et au-delà, de nombreuses innovations technologiques concurrentes (pour l'offre et dans les secteurs de demande) ainsi que la décentralisation de la production, autant d'éléments qui rendent inopérantes une simple poursuite des tendances passées. C'est à cette complexité accrue et l'interaction entre les filières techniques classiques ou émergentes, le coût et les gisements des ressources, et la temporalité des objectifs politiques pour 2020, 2030, 2050 ou au-delà, qu'une approche de type TIMES peut apporter un éclairage intéressant.

2.3 CONTRIBUTIONS

Répondre à des préoccupations stratégiques à l'échelle d'un pays ou de grandes régions du monde demande des modèles multisectoriels dont le niveau de détail permet de calculer les sorties en un temps raisonnable. Parallèlement les filières nouvelles impliquent, pour en saisir correctement les conditions de faisabilité et les implications, un raffinement beaucoup plus poussé. La problématique de la modélisation comme démarche exploratoire est de ne pas opposer ces deux dimensions mais d'avancer sélectivement sur chacune d'elles en fonction des problématiques abordées. Mes contributions s'appuient en grande partie sur les principes des modèles TIMES pour construire des modèles numériques de systèmes énergétiques qui soient adaptés aux différentes échelles d'analyse[8].

J'ai développé dans le cadre de mes travaux le modèle TIMES-FR qui décrit le système énergétique de la France métropolitaine. Son développement s'est fait dans le cadre des projets européens NEEDS[9] et RES2020[10] ; il est poursuivi aujourd'hui dans le cadre de la Chaire Modélisation Prospective au service du Développement Durable.

[8] Ces enjeux de modélisation sont valables de façon plus ou moins directe pour les autres approches de modélisation des systèmes énergétiques. Cependant, dans des mécanismes purement macroéconomiques (pour les approches économiques) ou des modes de représentation du système climatique ou du calcul des dommages (pour les modèles climatiques ou les IAMs) dominent probablement la finesse des choix techniques dans les préoccupations des modélisateurs.

[9] New Energy Externalities Development for Sustainability

[10] Monitoring and Evaluation of the RES directives implementation in EU27 and policy recommendations for 2020

L'analyse des enjeux futurs des systèmes électriques soulève elle des problématiques spécifiques d'équilibre offre-demande sur des échelles de temps fines et des enjeux de fiabilité des réseaux. Ces enjeux sont au cœur de la faisabilité de systèmes à forte proportion de renouvelables et notamment de l'estimation de leurs coûts. De fait, une compétitivité évaluée sur des coûts moyens calculés indépendamment pour chaque filière, bien que simple de mise en œuvre, n'est pas satisfaisante. Cet axe de recherche a nécessité la mise en œuvre de modèles sectoriels plus précis. Enfin, les filières bioénergies sont traditionnellement perçues de façon simplifiée comme un moyen de baisser le contenu carbone des carburants dans les transports. Cette perception masque des réalités complexes liées à la diversité des ressources mobilisables, à l'interaction avec les filières forestières et agricoles, à l'existence d'une compétition pour la biomasse entre électricité chaleur et carburant, et enfin à la diversité des chemins technologiques possibles. Ici aussi des modèles prospectifs dédiés sont nécessaires pour appréhender les enjeux prospectifs de la filière bioénergie française. Le Tableau 1 résume les contributions portant sur l'analyse des flux énergétiques. Trois exemples sont présentés avec plus de détails.

Echelle de représentation	Cadre	Problématique	Références
Modélisation d'ensemble du système énergétique français	Commission Energie du Centre d'analyse stratégique	Faisabilité d'une division par 4 des émissions françaises	[17]
	Initiative REMAP 2030 de l'IRENA	Evaluation de l'effet d'un doublement de la part des renouvelables à l'horizon 2030	[18]
	Chaire Modélisation Prospective au service du Développement Durable	Evolution de la place du gaz naturel dans le mix énergétique français	[19]
Modélisation du secteur de la production électrique	Commission Energie 2050 de la DG trésor	Analyse du secteur électrique pour différents scénarios de sortie du Nucléaire	[20]
	Travaux de thèse de Mathilde Drouineau	Intégration de renouvelable dans le mix électrique de l'Ile de la Réunion	[21]
	Travaux de thèse de Vincent Krakowski	Enjeux de scénarios à forte proportion d'énergie renouvelable pour le système électrique français	[22] [23]
Modélisation de la filière biomasse	Projet VALERBIO	Modélisation des filières techniques pour la biomasse	[24]
	Travaux de thèse de Paul Hugues	Stratégie française pour la filière bioénergie	[25] [26]

Tableau 1. Synthèse de contributions portant sur la représentation des flux énergétiques à différentes échelles

2.3.1 *ALLOCATION ET ENJEUX PROSPECTIFS POUR LA FILIERE GAZ*

La question de recherche de cette étude est celle des usages futurs du gaz naturel pour les différents secteurs de demande à l'horizon 2050. La France post-crise pétrolière a vu l'usage du gaz tripler pour représenter aujourd'hui près de 13 % de l'énergie primaire. Le gaz naturel est aussi la moins carbonée des ressources fossiles qui contribuent encore à hauteur de 42 % à l'approvisionnement en énergie primaire. Le gaz naturel n'a cependant pas de marchés fondamentalement captifs. Quels effets aura dès lors la prise en compte d'objectifs environnementaux plus ou moins contraignant ? L'analyse proposée évalue pour éclairer cette problématique, la sensibilité des usages du gaz à différentes hypothèses portant sur les prix des énergies importées, l'intensité de la politique nucléaire, la disponibilité plus ou moins forte de la capture et séquestration du carbone et l'intensité des politiques de réduction des émissions de CO_2. Dans cette étude, les différentes combinaisons d'hypothèses conduisent à la sélection de 24 scénarios qui permettent de couvrir plusieurs conditions de compétitivité. La synthèse ci-dessous vise à illustrer l'apport d'une modélisation TIMES multisectorielle pour l'analyse de dynamiques complexes de choix technologiques à l'échelle de la France.

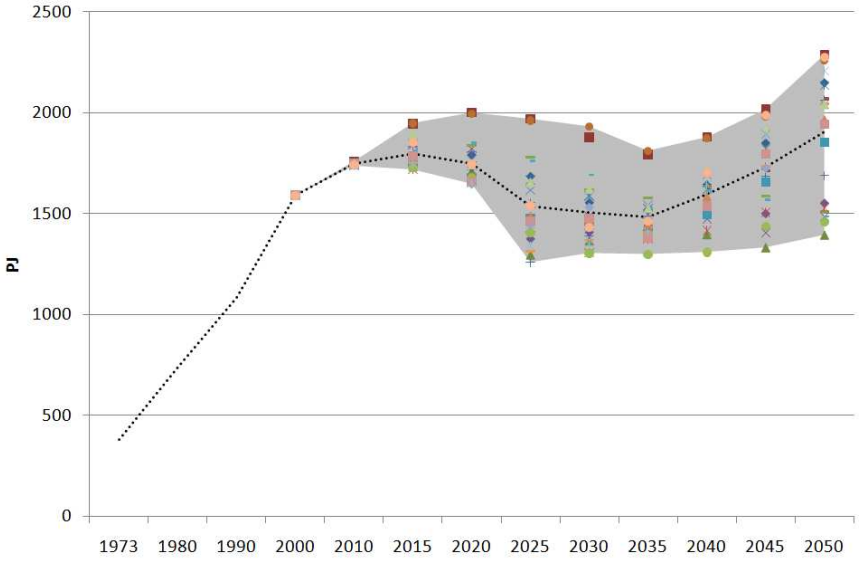


Figure 2. Evolution des consommations de gaz naturel pour les différents scénarios

L'enveloppe des scénarios simulés couvre un large spectre de trajectoires conduisant à une croissance de 30 % ou une baisse de 20 % par rapport au niveau de 2010. L'incertitude en fin d'horizon atteint 247 TWh ! L'intérêt du modèle[11] va être alors de permettre de détailler les mécanismes de substitution technologique sous-jacents à chaque trajectoire et leur lien avec les hypothèses retenues pour chaque scénario. Les principaux résultats montrent :

[11] Dans les limites de son paradigme d'optimalité.

- Une moindre compétitivité du gaz sur ses marchés dominants aujourd'hui (Industrie et bâtiments) qui conduit à des baisses de 24 % à 52 % sur ces segments. La baisse maximale étant obtenue pour une division par 4 des émissions de CO_2;
- Une compétition du gaz naturel dans le secteur de la production électrique avec les centrales utilisant des gaz renouvelables (biogaz et gazéification de la biomasse) ou de la gazéification du charbon associée à de la capture de CO_2. Ainsi, les cycles combinés à gaz restent les options privilégiées mais les sources de gaz diffèrent. Seuls les scénarios de sortie du nucléaire assurent, dès une division par trois des émissions, une part fortement croissante du gaz dans le mix électrique.
- Un fort potentiel de développement dans le secteur des transports comme substitut au pétrole pour des objectifs de décarbonation ambitieux. Les hypothèses retenues conduisent à un potentiel de 105 TWh pour une division par 4 et de 222 TWh pour une division par 2. Une réduction des émissions plus forte ayant pour effet de réduire le recours au gaz naturel malgré la possibilité de véhicules hybrides gaz naturel.

Les analyses de sensibilité menées ont aussi mis en avant l'importance de contraintes sur l'environnement technologique et notamment sur la part du nucléaire dans le mix électrique voire d'hypothèses plus pessimistes sur le déploiement des technologies de capture et séquestration.

Nuclear share	Prices	Tax30	F2	F3	F4
BAU Nuclear	Low fossils	-9.3 %	-26.3 %	-14.5 %	-9.1 %
	High fossils	-31.5 %	-26.0 %	-17.0 %	-8.7 %
	High oil_Low Gas	-29.6 %	-23.1 %	-14.3%	-8.8 %
Low Nuclear	Low fossils	-9.4 %	-20.1 %	-10.0 %	-6.6 %
	High fossils	-31.5 %	-21.4 %	-9.2 %	-7.0 %
	High oil_Low Gas	-30.1 %	-21.5 %	-11.7 %	-7.0 %

Tableau 2. Variation de la consommation totale de gaz naturel dans l'hypothèse pessimiste d'une industrie automobile qui ne développe pas de véhicule particulier fonctionnant au gaz naturel

Pour le secteur des transports, la sensibilité des résultats à un développement effectif de solutions de motorisations gaz pour les véhicules particuliers (Tableau 2) a aussi été testée dans un jeu de 24 nouveaux scénarios où cette option a été exclue de la base de technologies disponibles. La rationalité de ces simulations additionnelles où le périmètre de la base de technologie est modifié est de montrer l'enjeu, pour des filières nouvelles, d'un développement commercial effectif et d'identifier les options immédiatement concurrentes.

2.3.2 *EXPLORER DES TRANSITIONS VERS DES SYSTEMES ELECTRIQUES 100% RENOUVELABLES POUR LA FRANCE*

Le fonctionnement des systèmes électriques repose sur un équilibre de l'offre et de la demande qu'il est nécessaire de garantir sur des échelles de temps plus fines que celles requises pour les autres vecteurs énergétiques. Une modélisation de long terme qui détermine uniquement des bilans annuels en énergie simplifie de fait les contraintes de dimensionnement et tend à sous-estimer les coûts associés à la génération d'électricité. C'est l'une des principales critiques qui peut être faite aux modèles plus globaux où une décarbonation du secteur électrique s'appuie uniquement sur des coûts complets relatifs à des équilibres au pas annuel. Pour réduire ce biais, le modèle TIMES-FR couvrant le périmètre de la France métropolitaine et l'ensemble des secteurs de demande distingue, dans sa version actuelle, 12 échelles de temps infra-annuelles : 4 saisons (Hiver, printemps, été, automne) et trois périodes journalières (jour, nuit, pic). Ce découpage temporel reste néanmoins limité lorsqu'il s'agit d'estimer plus précisément des enjeux d'équilibrage de plus court terme du système électrique pour des parts croissantes de sources d'énergie intermittentes. Il est alors nécessaire d'améliorer la description des gisements et de la dynamique des solutions concurrentes.

En complément de cette exigence d'un équilibre en puissance active à chaque instant, la gestion d'un système électrique doit garantir le contrôle de la tension et de la fréquence du réseau en cas d'aléas sur le réseau. En effet, tout déséquilibre entre l'offre et la demande induit une variation de la fréquence globale qu'il convient de contenir dans un intervalle de plus ou moins 0.5 Hz. C'est l'un des challenges de la fiabilité des systèmes électriques. Sa gestion opérationnelle repose sur la mobilisation de réserves primaires automatiques et de réserves secondaires qui sont mobilisables sur des pas de temps de moins d'une seconde à quelques minutes. Nous sommes bien au-delà des capacités de résolutions de n'importe quel modèle prospectif des systèmes énergétiques ! Des travaux menés au Centre de Mathématiques Appliquées dans le cadre de deux thèses [27,28] [21] ont permis de proposer une approche originale basée sur le calcul de deux grandeurs globales, un indicateur de réserve cinétique et un indicateur de réserve magnétique. Leur intégration à la modélisation TIMES comme consigne de fonctionnement permet alors une prise en compte de cette exigence de flexibilité.

L'analyse proposée dans [23] étudie différents scénarios de pénétration massive de source d'électricité renouvelable intermittentes à l'aide d'un modèle TIMES du système électrique français. Elle a été effectuée dans le cadre de la Thèse de Vincent Krakowski. Nous en proposons ici un résumé. Le périmètre de ce modèle dédié permet notamment de décrire :

- Une dynamique temporelle plus fine qui identifie en particulier une semaine critique de faible disponibilité solaire et éolienne (Figure 3);
- Des possibilités d'optimisation conjointe du profil de la demande (« demand-response ») et de l'offre d'électricité ;
- Les indicateurs globaux de réserve cinétique et magnétique ;

- L'allocation des technologies de production d'électricité et le niveau des échanges pour différents niveaux de pénétration des énergies renouvelables ;

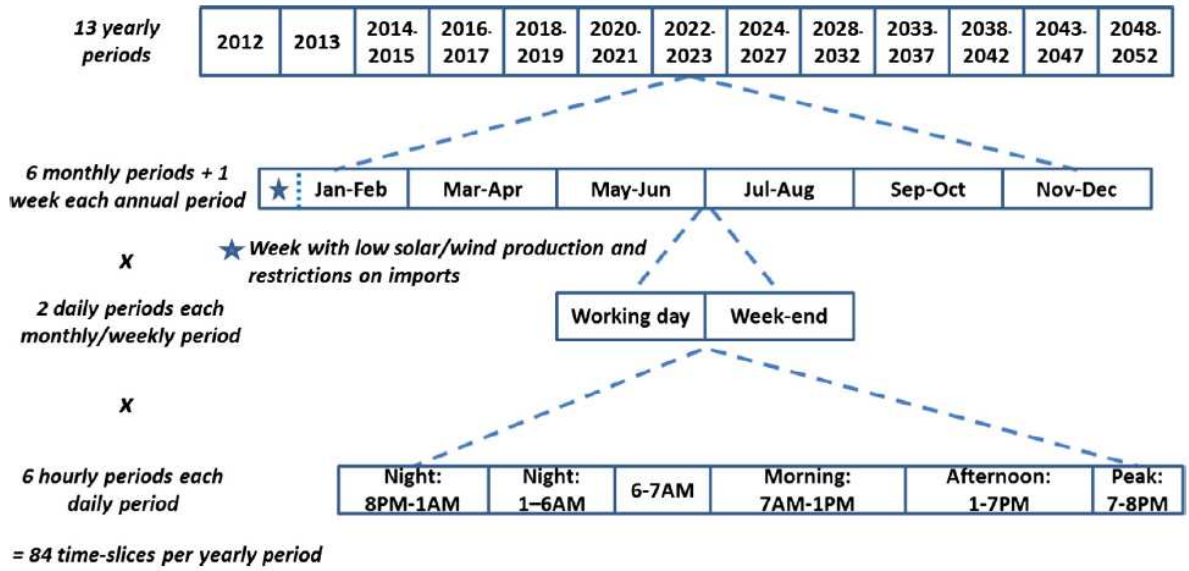


Figure 3. Désagrégation temporelle retenue dans l'étude [23]

L'investigation menée dans cette étude aborde plusieurs aspects de l'intégration des ressources intermittentes à travers 20 scénarios et pour des taux de pénétration des renouvelables de 40 à 100 %.

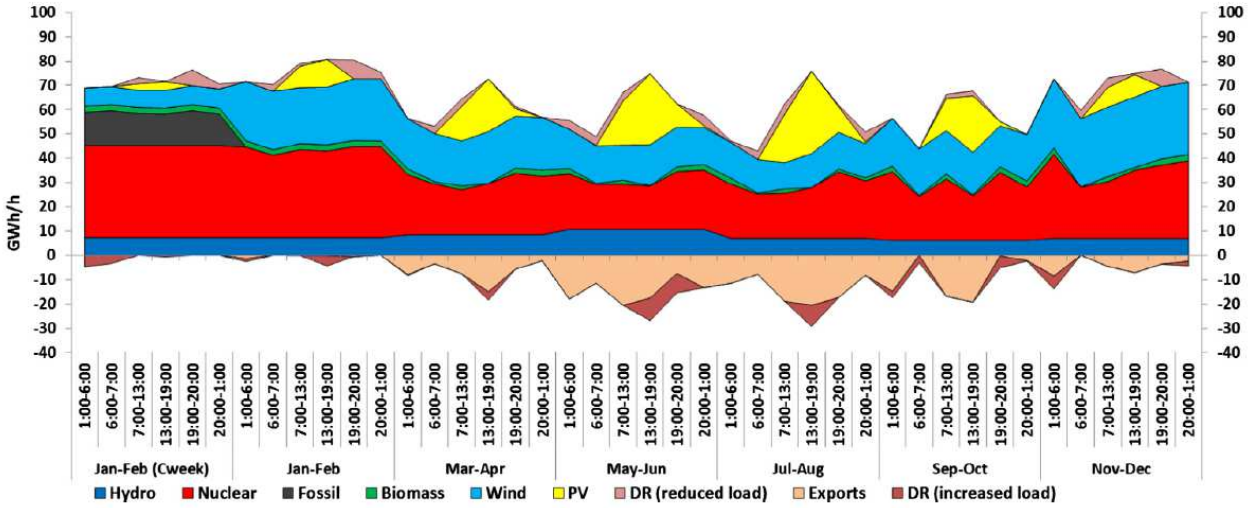


Figure 4. Structure de la production électrique (2050) pour une contrainte minimale de 60 % d'ENR

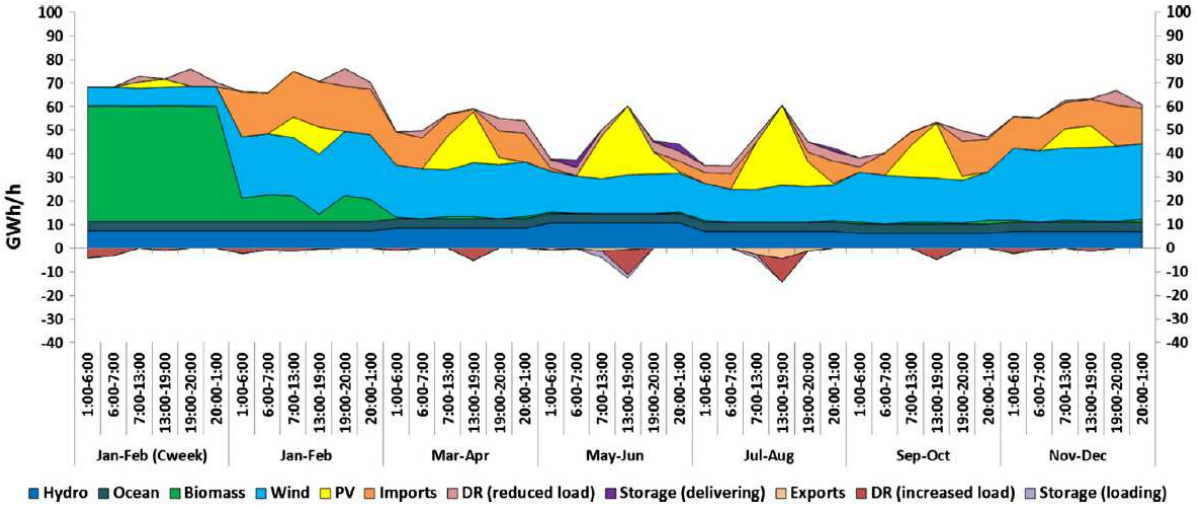


Figure 5. Structure de la production électrique (2050) pour une contrainte minimale de 100 % d'ENR

Les Figure 4 et Figure 5 illustrent l'allocation optimale des options concurrentes dans le cas de contraintes de part de production renouvelable de 60 % et 100 % et démontrent l'intérêt d'une modélisation plus précise de la dynamique des moyens de production. Pour un objectif de 60 %, l'énergie nucléaire joue toujours un rôle important dans le système électrique français avec un fonctionnement préférentiellement en base à l'échelle mensuelle. La variabilité saisonnière de la production éolienne et solaire en particulier génère pour ce scénario, d'importants excédents pendant 4 à 6 mois compensés par le pilotage de la demande et un recours aux exportations. Enfin, la semaine critique de faible disponibilité des sources intermittentes requiert l'utilisation ponctuelle de moyens fossiles comme solution au coût minimum. Comparativement, un objectif de 100 % d'électricité renouvelable entraîne mécaniquement une sortie du nucléaire. L'ajustement de l'offre et de la demande passe alors par une annulation des exportations et un recours massif aux importations en particulier sur la période hivernale. De mai à août, la disponibilité du pilotage de la demande et du stockage offre une flexibilité qui limite le recours aux importations entre 20 h et 6 h, périodes pendant lesquelles la production solaire est nulle. Ce scénario mobilise enfin le gisement de biomasse pour satisfaire la demande pendant la semaine critique.

Les différents scénarios analysés dans cette étude mettent en évidence l'effet d'hypothèses supplémentaires relatives à la disponibilité des importations, au potentiel de biomasse, à la disponibilité du pilotage de la demande et à l'indicateur de réserve cinétique. Une modélisation prospective dédiée permet ainsi d'éclairer dans une perspective systémique les interactions entre les options technologiques disponibles et la temporalité des contraintes.

2.3.3 *LES APPORTS D'UNE MODELISATION DEDIEE DE LA FILIERE BIOENERGIE*

La substitution de carburants conventionnels par les biocarburants reste l'une des options privilégiées des stratégies de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur des transports. A l'échelle mondiale la production de biocarburants a ainsi plus que doublé en 10 ans pour représenter aujourd'hui près de 3 % de la consommation d'énergie finale des transports[12]. Bien que ce rythme de développement soit soutenu, le potentiel de substitution demeure donc considérable. Ainsi pour le plus long terme, l'Agence Internationale de l'Energie projette, dans l'édition 2016 du World Energy Outlook [29], un taux de croissance annuel moyen de 4 % d'ici 2040 pour les biocarburants dans le cadre de son scénario « New Policies ». Ce taux s'élève à 7 % dans son scénario de réduction des émissions de gaz à effet de serre le plus ambitieux. De même en France, les biocarburants font partie des leviers de la politique énergie-climat. Quelle peut-être leur contribution à moyen et à long terme? Quelle est l'influence de mécanismes de soutien tels que les objectifs quantitatifs de production ? En effet, du fait de coûts de production supérieurs à ceux de l'essence ou du diesel, leur développement est aujourd'hui encadré et accompagné par des quotas d'incorporation dans ces carburants conventionnels ; quotas dont l'objectif est aussi de garantir une visibilité pour les acteurs.

Pour répondre à ces interrogations, une distinction entre les différentes voies de valorisation de la biomasse et les ressources qu'elles mobilisent est nécessaire. Les principes des modèles de type TIMES appliqués à ce secteur permettent alors d'explorer l'articulation des choix technologiques disponibles dans le temps et selon la typologie et le niveau des gisements disponibles. Mes travaux de recherche sur cette thématique ont été initiés dans le cadre du projet européen RES2020 et ont conduit à l'élaboration d'un modèle dédié pour la France dans le cadre du projet VALERBIO. Ce projet mené en partenariat avec l'IFP, le FCBA et l'INRA, de 2006 à 2009, a en particulier été l'occasion d'un travail désagrégé sur la structure des gisements forestiers et agricoles pour différents schémas d'exploitation. L'analyse proposée dans [24] décrit la mobilisation des gisements régionaux pour différents objectifs de production de bioénergie. Ces travaux ont été prolongés et significativement étendus avec la thèse de Paul Hugues par une représentation plus complète des chemins technologiques, une analyse des potentialités offertes par la chimie dite bio-sourcée qui utilise la biomasse comme matière première et une analyse de certaines incertitudes relatives au différents procédés de deuxième et troisième génération. La Figure 6 synthétise les grandes lignes du modèle d'allocation optimale développé pour la filière bioénergie. Elle distingue horizontalement les étapes de mobilisation des ressources, de conditionnement et de transport, de transformation et de satisfaction de demandes finales de chaleur d'électricité ou de carburants. Pour chaque étape une lecture verticale décrit alors les différents choix de commodités ou de procédés disponibles.

[12] Cette production mondiale de biocarburants reste néanmoins très concentrée. Les Etats-Unis et le Brésil assurent plus de 80 % de la production mondiale d'éthanol et 27 % de celle de biodiesel. Source : http://www.eia.gov/beta/international/data/browser/

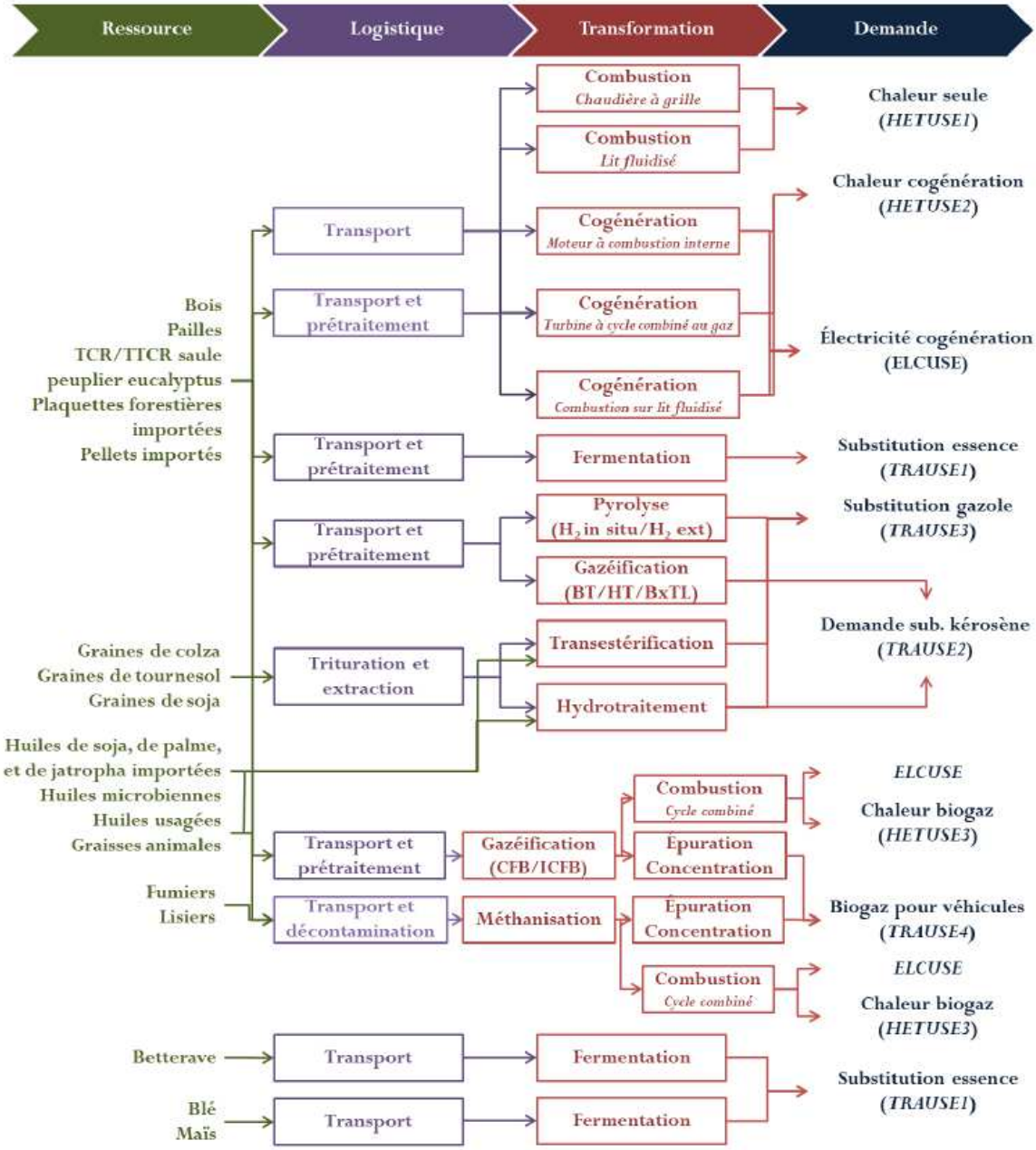


Figure 6. Système énergétique de référence synthétique du modèle bioénergie France [30]

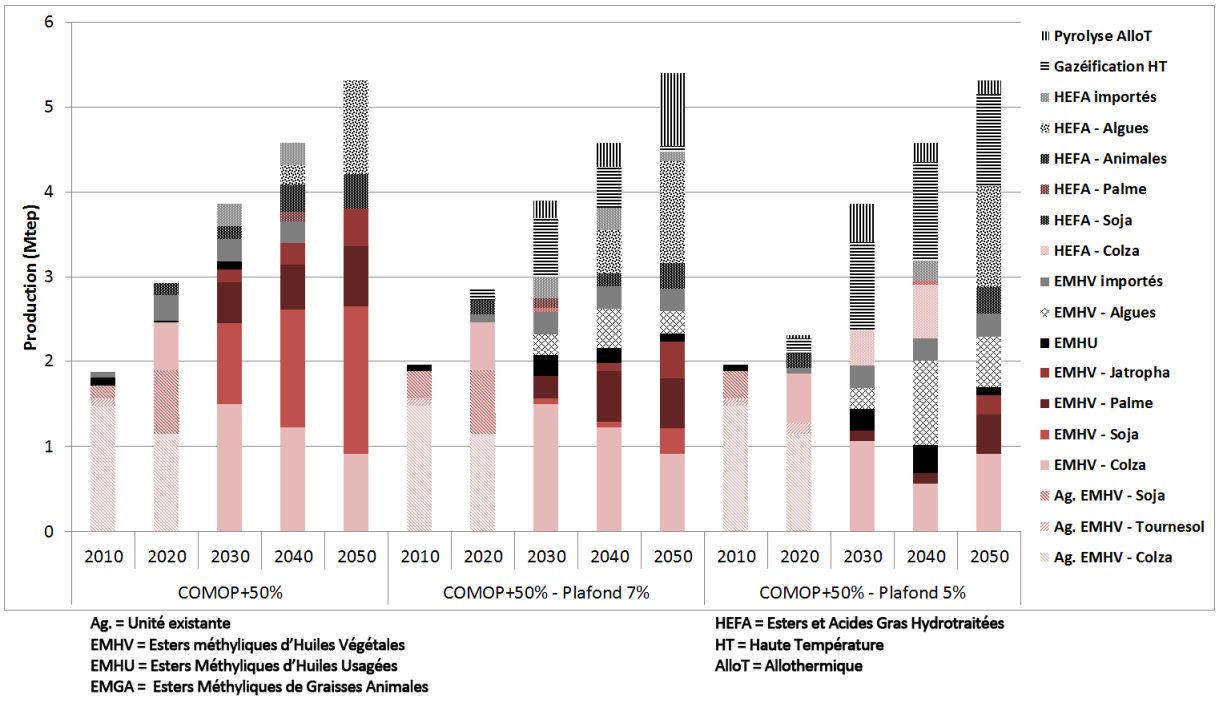


Figure 7. Illustration de l'allocation des technologies pour une substitution gazole et pour différents scénarios [25]

Une illustration de la flexibilité des voies de valorisation est donnée par la Figure 7. Pour l'ensemble des trois scénarios, la demande de bioénergies est établie selon les orientations du COMOP 10[13]. A l'horizon 2050 une augmentation de 50 % est supposée : COMOP + 50 %. Les scénarios 2 et 3 supposent par contre un plafonnement du taux d'incorporation de carburants de première génération à 7 % et 5 %. Ces contraintes permettent le développement de biocarburant de seconde génération dont les coûts de production sont plus élevés. Les procédés de gazéification puis de pyrolyse de la biomasse sont alors mobilisés. Sur le plus long terme, l'hydrotraitement d'huile algale permet enfin de satisfaire l'augmentation de la demande, et ce d'autant plus que le plafond d'incorporation de biocarburant de première génération est bas.

[13] Selon le « Plan de développement des énergies renouvelables à haute qualité environnementale » proposé à la suite du Grenelle de l'environnement.

III. BILAN DE TRAVAUX DE RECHERCHE PORTANT SUR L'ANALYSE DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES SYSTEMES ENERGETIQUES PAR LA MODELISATION

Cette section décrit des travaux qui s'appuient sur une modélisation technique des systèmes énergétiques afin d'explorer des problèmes mis en avant par l'économie de l'environnement et aujourd'hui présents dans la formulation des politiques publiques en matière d'énergie. Le concept central en est celui d'externalité[14] (positive ou négative) qui se définit comme l'ensemble des impacts des décisions prises par un agent économique donné sur le profit ou l'utilité d'un autre agent sans aucune contrepartie monétaire. Il s'agit d'une des formes de défaillance de marché qui justifie l'intervention de l'état. De ce concept vont découler pour nous deux questions pratiques : la caractérisation concrète des externalités et de leur niveau d'une part, et les méthodes de calcul de la valeur économique qui leur est attribuée, d'autre part. La première a trait au périmètre d'analyse tandis que la seconde est (dans sa forme néoclassique) une monétisation des externalités.

Mes travaux de recherche dans ce domaine portent sur l'effet d'une prise en compte des externalités sur le « merit-order » technologique et les choix d'investissement sur le long terme. La première sous-section décrit les travaux relatifs à l'estimation de la valeur monétaire du CO_2 comme élément de dimensionnement des politiques énergie-climat. Dans la seconde, la modélisation des externalités liées aux biocarburants et la question de la durabilité de ces carburants seront considérées. Enfin, la troisième sous-section évoquera des travaux portant sur l'eau comme externalité des systèmes énergétiques dans ce qui est aujourd'hui identifié comme le nexus eau-énergie.

3.1 LA VALEUR DU CARBONE ET L'APPORT D'UNE APPROCHE PAR LA VALEUR DUALE

3.1.1 DESCRIPTION DE LA PROBLEMATIQUE

La théorie économique propose de corriger les défaillances de marché causées par les externalités par trois principaux mécanismes : les taxes (et les subventions), les normes techniques, la négociation de droits[15] d'émissions sur un marché. L'application de ces principes à la problématique du changement climatique est notamment mise en évidence par une littérature

[14] Le périmètre des externalités est bien plus étendu que les seuls enjeux liés aux gaz à effet de serre. A titre d'exemple, les externalités négatives des transports en France couvrent aussi bien des effets physiques tels que la pollution et le bruit, que les pertes économiques dues au nombre d'accidents ou à la congestion. L'accessibilité, les gains de productivité, et l'amélioration de la mise en concurrence sont communément reconnus comme externalités positives des transports.

[15] Pigou en 1920 dans son article « Economics of Welfare »propose l'idée d'une internalisation par une taxe dont le montant est égal à la valeur monétaire des externalités. En 1960, Coase propose l'idée d'une négociation … Ces deux contributions majeures fondent la justification théorique de nos taxes CO_2 et marchés de permis modernes. Aujourd'hui, la critique portée par le courant « ecological economics » conteste cette vision qui demeure néoclassique et en particulier le fait que seule l'utilité pour l'espèce humaine confère une valeur aux biens environnementaux.

très active sur la thématique de la valeur monétaire d'une tonne de carbone comme guide de l'action publique. Cette notion a plusieurs acceptions et il importe de préciser brièvement trois d'entre elles :

- Lorsque la valeur du carbone est déterminée à partir d'une monétisation de l'ensemble des dommages futurs que les auteurs attribuent au changement climatique, elle reflète un « coût social » du carbone au sens du coût marginal supporté par la société. Son évaluation mobilise des fonctions de coût de dommage stylisées pour différentes régions du monde et repose sur des modèles globaux de type IAM.
- Lorsqu'elle est déterminée par rapport à un objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre, elle se définit alors comme un coût marginal d'abattement. Sa valeur reflète l'empilement par ordre croissant des mesures de dépollution prises en compte dans les différents modèles.
- Enfin, les marchés de permis d'émissions proposent une valorisation du carbone de plus court-terme qui reflète principalement le niveau de quotas alloués, les perspectives d'activité économique des industries impliquées, et leurs options de réduction des émissions à court terme.

Pour la France, la valeur tutélaire du carbone constitue le référentiel officiel pour l'action publique. Une première évaluation en est donnée en 2001 dans le rapport du Commissariat général au Plan présidé par Marcel Boiteux sur le coût des nuisances du secteur des transports [31]. Conceptuellement très riche, ce rapport décrit les enjeux et la complexité liés à la fixation d'un tel référentiel avant de proposer quelques principes pour une valeur carbone dont le sens comme choix politique est assumé : une valeur de base fixée à 27 €[16]/tCO_2 pour la période 2000-2010, une évolution au-delà de 2010 guidée par un taux de croissance annuel[17] de 3 %, et une révision périodique de cette valeur. En 2008 une seconde commission présidée par Alain Quinet procède à une révision de cette valeur tutélaire dans un rapport explicitement consacré à la valeur tutélaire du carbone [32]. Si ces travaux conservent les intuitions du rapport Boiteux, une question originale va être soulevée, celle de la valeur à retenir à l'horizon 2030. La commission Quinet s'appuie sur trois modèles[18] (POLES, IMACLIM-R, et GEMINI-E3) pour en fixer les ordres de grandeur et retient une valeur de 100 €/tCO_2 (afin de refléter des engagements de réduction ambitieux). Au-delà de 2030, si le principe d'un taux de croissance annuel est conservé, sa valeur est actualisée à 4 %. Enfin, entre 2010 et 2030, le rapport préconise un taux de croissance de 5,8 % permettant de relier son niveau pour 2010 tel qu'établi par le Rapport Boiteux à la valeur 2030 proposée. La Figure 8 compare les trajectoires de valeur du CO_2 recommandées par ces

[16] En euros 2000.
[17] La justification théorique s'inspire de la Règle dite de Hotelling qui suggère pour les actifs non renouvelables une évolution du prix à un taux au moins égal au taux d'intérêt afin de valoriser leur rareté. Le rapport Boiteux en précise les intuitions utiles et les limitations pour l'évaluation monétaire des externalités liées au carbone.
[18] POLES est un modèle économique d'équilibre partiel, IMACLIM-R et GEMINI-E3 sont deux modèles macroéconomiques avec un effort plus conséquent de description du contenu technique pour le modèle IMACLIM-R.

deux rapports. Une perspective plus large est de nouveau adoptée en 2013 par une troisième commission présidée par Emile Quinet qui propose une actualisation exhaustive des valeurs de référence à retenir pour l'évaluation des choix d'investissement par l'Etat [33]. Dans sa section dédiée à la valeur tutélaire du carbone, ce rapport reprend l'essentiel des préconisations de la commission de 2008 tout en actualisant à 4,5 % le taux de croissance annuel au-delà de 2030. Cette valorisation du carbone est aujourd'hui matérialisée pour partie dans la contribution climat énergie intégrée à la fiscalité énergétique. La récente loi relative à la transition énergétique retient, en effet, le principe d'une pénalité de 56 €/tCO_2 en 2020 puis de 100 €/tCO_2 en 2030.

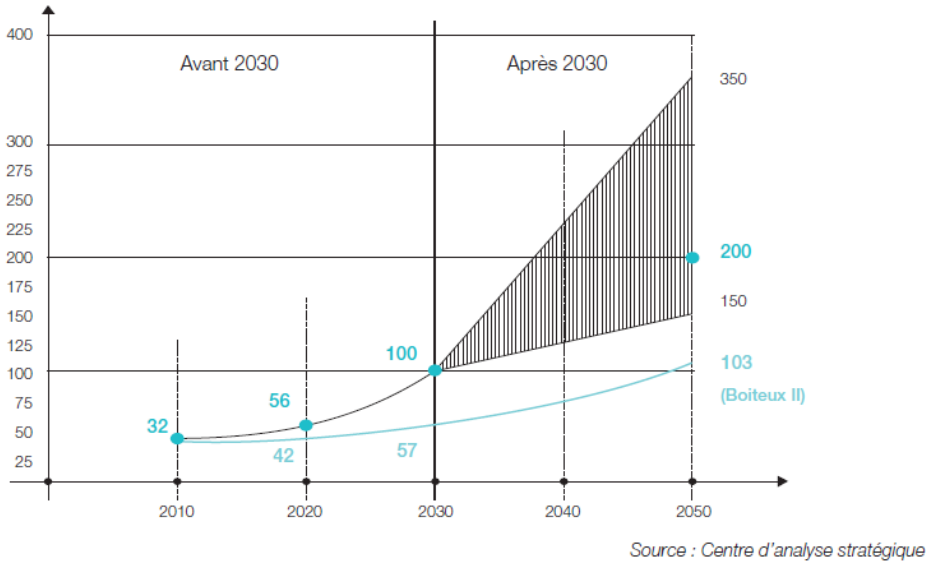


Figure 8. Trajectoires de la valeur tutélaire du CO_2 à l'horizon 2050 établie par le rapport Quinet. [32]

3.1.2 VERROUS ET ENJEUX POUR LA MODELISATION

Les principaux verrous associés à la détermination d'une valeur du carbone sont clairement identifiés par les auteurs des différentes études. Dans l'idéal, le « coût social » du carbone a pour objectif de mettre en regard une estimation des dommages futurs attribuables au changement climatique et les coûts de remédiation dans une approche dite coûts/bénéfice. Ceci suppose cependant de définir à l'échelle mondiale une métrique (monétaire qui plus est) des impacts du changement climatique. C'est une perspective ambitieuse dont les difficultés méthodologiques sont intrinsèques et sources de nombreuses controverses. La dispersion des valeurs reportées dans les études disponibles est particulièrement importante et est attestée, et régulièrement discutée, par plusieurs revues de la littérature. L'analyse menée en 2013 par Tol [34] recense 588 estimations de ce coût et en illustre la variabilité selon les taux d'actualisation choisis : 25 \$/tC (soit 6,8 \$/tCO_2) en moyenne pour les études supposant un taux d'actualisation[19] de 3 %

[19] Dans le calcul d'une valeur actuelle nette, ce taux pour effet de d'écraser (pondérer par un coefficient faible) les dépenses les plus lointaines. Un taux faible valorise donc mieux les dommages.

contre 296 $/tC (soit 80,5 $/$tCO_2$) pour celles supposant un taux nul. Isacs et ses co-auteurs rappellent [35] en outre que quatre modèles (PAGE, DICE, FUND et RICE) concentrent 90 % des évaluations du coût social du carbone. Dans une méta-analyse étendue à 809 estimations et publiée en 2015, Havranek et ses co-auteurs argumentent en faveur de l'existence d'un biais de publication [36] (« selective reporting ») qui se traduirait par une tendance des auteurs à publier préférentiellement les valeurs hautes de coût social du carbone issues des modèles et à exclure les valeurs non concluantes ou jugées trop basses. Pour Van den Bergh et Botzen à l'inverse, la principale critique [37] faite aux évaluations disponibles réside dans une formulation insuffisante des fonctions de dommages dans les modèles, en particulier en ce qui concernent l'impact des phénomènes extrêmes (caractérisés par de faibles probabilité d'occurrence mais des coûts élevés), de l'aversion au risque des décideurs ou du périmètre des dommages retenus. Leur analyse suggère de retenir des valeurs du coût social du CO_2 supérieures à 125 $/$tCO_2$.

Les difficultés de l'approche coûts/bénéfices ont conduit à une valorisation du carbone par des approches coût-efficacité définies pour des objectifs de réduction exprimés directement en tonnes de CO_2. Elles contournent ainsi la difficulté d'une évaluation monétaire des dommages. Isacs et ses co-auteurs en identifient [35] plusieurs limitations dont un traitement simplifié des défaillances de marchés et des barrières à l'adoption des technologies, la transparence des hypothèses principales, la possibilité d'un recyclage de la valeur de la taxe. La dispersion des valeurs reste importante et une méta-analyse menée par Kuik et ses co-auteurs conduit à des estimations comprises en 128 €/tCO_2 et 396 €/tCO_2 à l'horizon 2050 pour une division par plus de deux des émissions de gaz à effet de serre à l'échelle mondiale. Enfin, les valeurs tutélaires retenues pour la France proposent le principe d' « une approche pragmatique cout-efficacité » [32]. Le rapport Boiteux en identifiait déjà clairement les limites dès 2001 : « Généralement, dans les modèles dont on tire une valeur du carbone, la représentation du progrès technique et des sources d'énergie alternatives est fruste : le progrès technique y intervient comme une tendance exogène, les sources d'énergie alternatives apparaissent à une date prédéterminée, en quantité illimitée, à un prix connu». Le rapport Quinet reconnait aussi les limites de l'exercice de réconciliation[20] des valeurs issues des trois modèles pour l'horizon 2030 et plaide pour un compromis traduisant un « usage raisonné des modèles ».

3.1.3 CONTRIBUTIONS

Ma démarche de recherche suppose de voir chacune de ces estimations comme une exploration quantitative d'un déterminant important de l'action publique à travers des modèles variés. Sur cette problématique et à partir des études précédentes, je me suis intéressé à la valorisation du carbone pour la France, à son niveau implicite dans les engagements de réduction des émissions de gaz à effet de serre, à ses présupposés technologiques et à la forme de sa trajectoire de long terme. Dans [38] nous sommes pour cela partis du modèle TIMES-FR pour exprimer la valeur du

[20] Les valeurs déterminées par les trois modèles à l'horizon 2030 étaient de 97 €/tCO_2 pour le modèles POLES, 58 €/tCO_2 pour le modèle GEMINI-E3 et 150 €/tCO_2 pour le modèle IMACLIM-R.

carbone comme la valeur duale d'une contrainte carbone explicitement formulée. Cette approche permet d'enrichir les évaluations disponibles en :

- Adossant la valeur du carbone ainsi déterminée à une représentation plus explicite des choix technologiques pour la France ;
- Faisant l'économie d'hypothèses supplémentaires sur la trajectoire inter-temporelle de la valeur du carbone. L'approche duale permet, en effet, de l'exprimer directement en relation avec le profil de réduction des émissions de CO_2 considéré ;
- Testant l'effet d'hypothèses contrastées relatives à la vitesse d'adoption ou à la limitation de l'utilisation de certaines technologies;

Le périmètre de ces travaux inclut l'effet d'un feedback sur les demandes de service énergétique par le biais d'une élasticité-prix. Les principales limitations en sont pour rappel que :

- Le paradigme d'optimisation propose une vision idéale et extrêmement rationnelle des choix d'investissements. Les valeurs obtenues constituent en ce sens des estimations optimistes.
- D'un point de vue macroéconomique, l'éventualité d'un « double-dividende » résultant d'un recyclage de la pénalité carbone n'est pas considérée. Un tel double-dividende pourrait induire en théorie un effet macroéconomique positif.

Dans cette étude nous avons élaborés 9 scénarios compatibles avec une réduction de 60 % des émissions de CO_2 à l'horizon 2050. Leur spécification permet d'étudier de façon explicite l'effet d'hypothèses différenciées sur la politique nucléaire, la vitesse de déploiement des technologies de capture et séquestration du CO_2, les biocarburants, le niveau du point de passage 2020 en termes de réduction des émissions, les niveaux de demandes de services énergétiques et les hypothèses sur l'élasticité de la demande.

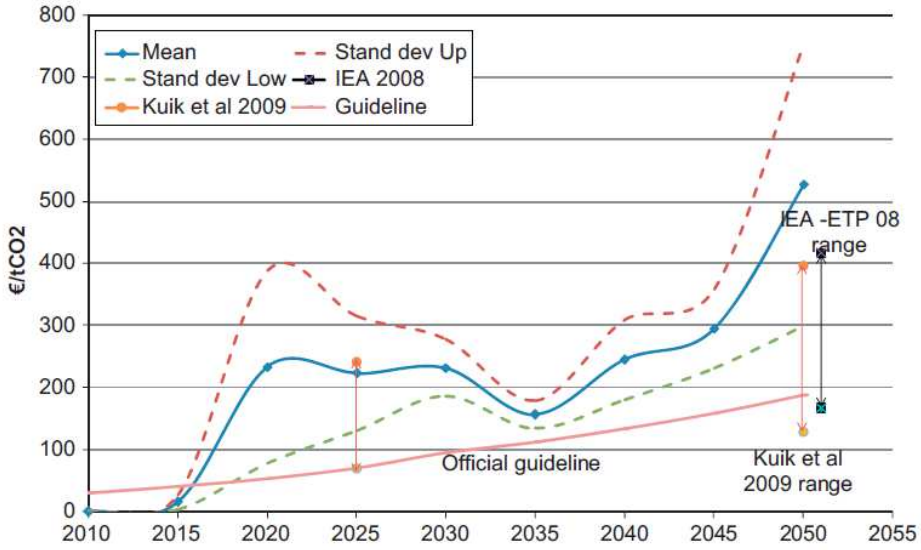


Figure 9. Synthèses des valeurs du CO_2 pour la France obtenues par la valeur duale de la contrainte de réduction. [38]

La Figure 9 résume les trajectoires temporelles de coûts marginaux d'abattement de la tonne de CO_2 (moyenne et écart type) calculées dans cette étude et les situe par rapport aux valeurs de la littérature. Les conclusions générales de cette étude tendent à montrer que :

- Seule l'hypothèse la plus optimiste génère des valeurs proches de la valeur tutélaire avec un niveau de 134 €/tCO_2 en 2030 et 196 €/tCO_2 en 2050 ;
- La trajectoire temporelle de la valeur carbone n'est pas toujours croissante. Elle dépend du timing des objectifs de réduction, de l'inertie des technologies existantes et de la disponibilité (et de la baisse de coût) des technologies alternatives. C'est l'intérêt d'une approche duale. A moyen terme la valeur duale de la contrainte de réduction des émissions sur la période 2020-2030 peut ainsi être supérieure à celle déterminée sur les périodes ultérieures.
- La comparaison avec les évaluations disponibles montrent que nos valeurs se situent dans la fourchette haute des estimations avec des valeurs maximales environ deux fois plus importantes. Ceci traduit le fait que, pour les demandes de services et les valeurs d'élasticité considérées, une réduction de plus de 60 % des émissions de CO_2 est difficile à atteindre et d'autant plus coûteuse que le rythme d'adoption des technologies bas carbone est contraint.
- Ces résultats issus d'une approche optimale (et donc optimiste en terme de rationalité) tendent aussi à montrer que les évaluations de la valeur du carbone à des échelles plus large surestiment encore plus les vitesses de substitutions technologiques.
- Enfin, en dehors de l'approche et l'argumentation portée par Van den Bergh et Botzen [37] en faveur d'un coût social élevé, les estimations du coût social du carbone sont beaucoup plus faibles que les valeurs calculées pour la France.

3.2 L'IMPACT DE LA PRISE EN COMPTE DES EXTERNALITES SUR LES FILIERES BIOENERGIES

3.2.1 DESCRIPTION DE LA PROBLEMATIQUE

La combustion de biocarburants n'émet dans l'atmosphère que le carbone qui a été au préalable capturé lors de la phase de croissance de la biomasse. C'est le fondement de la contribution de la biomasse à la résolution de la problématique de l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre. Cependant, la prise en compte de l'ensemble des externalités de la filière révèle qu'à ce bilan nul sur le cycle de la biomasse il faut alors ajouter l'énergie nécessaire aux procédés de transformation, à la culture (dans le cas de ressources agricoles), et celles liées au changement d'affectation des sols. Ce principe de changement d'affectation des sols est critique pour l'évaluation environnementale des biocarburants. Il repose sur l'idée que les biocarburants mobilisent une part de surface agricole utile qui implique en retour la conversion d'un surcroit d'espaces forestiers ou autres en surfaces agricoles. Les ressources agricoles (et les biocarburants) étant échangés sur des marchés intégrés ce changement d'affectation met aussi en jeu des conversions indirectes beaucoup plus complexes à capter. Le fait que ces espaces

possèdent généralement un contenu plus riche en carbone et plus largement une plus grande biodiversité est la base de la controverse.

Progressivement va alors se développer une remise en cause de la durabilité des biocarburants. En France, plusieurs rapports de l'ADEME vont aborder cette problématique à partir de 2008. Celui établi par L'INRA en 2012 propose une méta-analyse [39] à partir d'une base de données bibliographiques de 564 évaluations du changement d'affectation des sols (directs et indirects) dont les grandes conclusions quantitatives sont :

- Une moyenne de 71,28 gCO_2eq/MJ de biocarburant contre 83,8 gCO_2/MJ pour les carburants conventionnels ;
- Mais une médiane à 48,45 gCO_2eq/MJ et un écart type de 165 gCO_2eq/MJ qui montrent la forte dispersion des valeurs ;
- D'autre part, 44 % des évaluations sont supérieures au seuil de 35 %[21] de réduction des émissions (CAS direct + indirect) par rapport aux carburants conventionnels ;
- 30 % des évaluations donnent des niveaux d'émissions supérieurs à ceux des carburants fossiles ;
- Enfin, les valeurs d'émissions sont fortement différentiées par type de biocarburant.

3.2.2 VERROUS ET ENJEUX POUR LA MODELISATION

Les méta-analyses existantes mettent en évidence l'influence des modes de représentation des filières (frontières du système, prise en compte des coproduits) sur la dispersion des résultats. Cette forte variabilité est aujourd'hui le problème principal pour les acteurs de la filière qui, pour bénéficier du cadre réglementaire des objectifs d'incorporation, doivent satisfaire au seuil des 35 % de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Les modèles d'équilibre économique de marchés agricoles sont les plus fréquemment mobilisés [40] [41] pour estimer ces émissions liées aux changements d'affectation des sols. L'intérêt de ces modèles réside dans leur capacité à simuler l'évolution des surfaces agricoles et des rendements sous l'effet de changement dans les prix relatifs des différentes commodités échangées. Un choc de demande supplémentaire liée aux biocarburants peut alors être introduit et répercuté, dans un cadre conceptuel cohérent, à l'ensemble des marchés agricoles. S'agissant de marchés agricoles, l'attention va cependant être préférentiellement mise sur les biocarburants de première génération que sont l'éthanol et le biodiesel. Par ailleurs, ces modèles ne se préoccupent qu'indirectement des choix technologiques à travers la variable prix.

Sur le long terme l'enjeu pour la modélisation des systèmes énergétiques va alors être d'intégrer ces externalités dans la définition des trajectoires de transition. Comment cette nouvelle donne interagit-elle avec la demande de bioénergie, les gisements des différentes matières premières et

[21] Ce seuil correspond à la limite réglementaire pour un biocarburant. Le pourcentage des évaluations au-delà de ce seuil passe à 72 % lorsque les émissions liées aux étapes de production transport et distribution sont comptabilisées.

les évolutions de coûts des options techniques ? Quelles modifications de la compétitivité des voies de valorisation à l'intérieur même des filières bioénergies avec la prise en compte des externalités ? Plus largement jusqu'où et pour quel surcoût peut-on envisager de baisser les émissions dues à la production de biocarburants ?

3.2.3 CONTRIBUTION

Mes travaux de recherche abordent cette problématique dans sa dimension prospective et technologique. On peut, en effet, voir encore ici que la filière concernée, et donc l'estimation des externalités associées, couvre des intrants et produits finaux variés qu'une approche agrégée des biocarburants ignore. L'extension du modèle TIMES sectoriel de la filière bioénergie française effectuée dans le cadre de la thèse de Paul Hugues a permis d'explorer ces questions [26] pour les valeurs d'émissions fournies dans l'annexe V de la directive européenne 2009/28/CE et pour plusieurs scénarios (Tableau 3).

Scenario	Assumptions
Current legislation	• Double counting for advanced biofuels until 2020 • No first generation biofuels consumption gap • No GHG emissions tax
Possible future legislation	• Quadruple counting for biofuels from waste until 2020 and Double counting for the other advanced biofuels until 2020 • First generation biofuels consumption gap • No GHG emissions tax
20 €/t Carbon tax	• No double counting • No first generation biofuels consumption gap • GHG emissions tax of 20 €/tCO2eq
100 €/t Carbon tax	• No double counting • No first generation biofuels consumption gap • GHG emissions tax of 100 €/tCO2eq
Reference scenario (LC2)	• Cost division by 2 in 20 years for thermochemical processes Cost division by 2 in 30 years for biochemical processes • No constraint on avoided GHG emissions • No monetization of externalities
LC2 - ML +15%	• Cost division by 2 in 20 years for thermochemical processes Cost division by 2 in 30 years for biochemical processes • Avoided GHG emissions must be 15% higher than in the reference scenario by 2050 • No monetization of externalities
LC2 - ML +35%	• Cost division by 2 in 20 years for thermochemical processes Cost division by 2 in 30 years for biochemical processes • Avoided GHG emissions must be 35% higher than in the reference scenario by 2050 • No monetization of externalities
LC1 - ML +15%	• No cost division • Avoided GHG emissions must be 15% higher than in the reference scenario by 2050 • No monetization of externalities
LC3 - ML +15%	• Cost division by 3 in 20 years for thermochemical processes Cost division by 3 in 30 years for biochemical processes • Avoided GHG emissions must be 15% higher than in the reference scenario by 2050 • No monetization of externalities
LC2 - Ext	• Cost division by 3 in 20 years for thermochemical processes Cost division by 3 in 30 years for biochemical processes • Avoided GHG emissions must be 15% higher than in the reference scenario by 2050 • Monetization of NRE consumption and eutrophication
LC2 - ML +15% - Ext	• Cost division by 3 in 20 years for thermochemical processes Cost division by 3 in 30 years for biochemical processes • Avoided GHG emissions must be 15% higher than in the reference scenario by 2050 • Monetization of NRE consumption and eutrophication

Tableau 3. Description des scénarios considérés dans [26]

Pour les biocarburants avancés et lorsque les procédés n'étaient pas décrits dans la directive, les valeurs correspondantes ont été déterminées à partir d'une revue de la littérature. Par ailleurs, deux formes d'externalités additionnelles ont été considérées : la quantité d'énergie non renouvelable pour chaque filière et l'eutrophisation des eaux associées aux biocarburants. L'ensemble des scénarios prospectifs définis a permis d'explorer: l'impact de limites

d'incorporation des biocarburants de première génération, l'effet des options de comptages multiples existantes pour les biocarburants avancés, l'effet du progrès technique à travers une division par deux ou trois des coûts des filières thermochimiques et biochimiques. Enfin, pour évaluer la faisabilité d'une filière biocarburant « bas carbone » plusieurs scénarios ont simulé une réduction incrémentale (théorique) des émissions globales de 5 % à 50 %. Les résultats peuvent être synthétisés ainsi :

- Pour la demande de biocarburant retenue (de 2,6 à 6,7 Mtep entre 2010 et 2050) les émissions évitées varient entre 11,5 $MtCO_2eq$ et 15,5 $MtCO_2eq$. En effet, les filières techniques modélisées ne permettent pas d'aller au-delà d'un niveau de 35 % d'émissions évitées supplémentaires ;
- Cette réduction supplémentaire des émissions implique toutefois des substitutions entre procédés qui conduisent à des valeurs duales de carbones élevées. Elles n'augmentent pas linéairement avec le niveau de réduction et varient, en fonction des hypothèses de baisse des coûts (comprises entre 5000-6000 €/tCO_2 pour un objectif d'émission évitées supplémentaires de 35 % contre 400-1000 €/tCO_2 pour une baisse de 20 %) ;
- Pour un objectif de 20 % d'émissions évitées supplémentaires, les carburants de première génération demeurent majoritaires avec des parts de marché de 49 à 65 %. Pour l'objectif maximal de 35 % d'émissions évitées supplémentaires, les carburants de troisième génération représentent alors 52 % du pool biocarburants (Tableau 4) ;
- Ces coûts marginaux élevés lorsqu'une économie de carbone maximale est recherchée suggèrent qu'en dépit d'émissions évitées plus faibles les biocarburants de première génération conserveront un rôle significatif ;
- De façon symétrique, le point précédent montre qu'une division par trois des coûts des biocarburants ne suffit pas pour en faire une solution compétitive sans contraintes sur l'incorporation de carburant de première génération ou de limite de disponibilité des ressources. S'agissant d'une filière nouvelle des baisses de coût plus drastiques sont concevables. Une étude récente du NREL [42] détaille différents procédés de production de biomasse algale et fixe des objectifs technico-économiques de R&D. Elle montre qu'en améliorant les rendements matières de production d'algues (au-delà de 30 g/m^2/jour) une vision optimiste des coûts de production de biocarburant permettrait d'atteindre un niveau de 1,2 $/litre d'équivalent essence.

No learning curve							*Division by 2 learning curve*							*Division by 3 learning curve*						
ML	Type	2010	2020	2030	2040	2050	ML	Type	2010	2020	2030	2040	2050	ML	Type	2010	2020	2030	2040	2050
0%	1G	100%	85%	80%	78%	82%	***0%***	1G	100%	85%	80%	79%	79%	***0%***	1G	100%	85%	80%	79%	78%
	LC	0%	12%	11%	10%	2%		LC	0%	12%	11%	6%	1%		LC	0%	12%	10%	5%	1%
	Algae	0%	3%	10%	12%	15%		Algae	0%	3%	10%	15%	20%		Algae	0%	3%	10%	16%	21%
5%	1G	100%	85%	80%	78%	80%	***5%***	1G	100%	85%	80%	79%	72%	***5%***	1G	100%	85%	80%	79%	72%
	LC	0%	12%	11%	10%	4%		LC	0%	12%	11%	6%	4%		LC	0%	12%	10%	5%	4%
	Algae	0%	3%	10%	12%	16%		Algae	0%	3%	10%	15%	24%		Algae	0%	3%	10%	16%	24%
10%	1G	100%	85%	80%	78%	74%	***10%***	1G	100%	85%	80%	79%	63%	***10%***	1G	100%	85%	80%	79%	63%
	LC	0%	12%	11%	10%	11%		LC	0%	12%	11%	6%	12%		LC	0%	12%	10%	5%	11%
	Algae	0%	3%	10%	12%	16%		Algae	0%	3%	10%	15%	25%		Algae	0%	3%	10%	16%	26%
15%	1G	100%	85%	80%	78%	69%	***15%***	1G	100%	85%	80%	79%	61%	***15%***	1G	100%	85%	80%	79%	54%
	LC	0%	12%	11%	10%	14%		LC	0%	12%	11%	6%	13%		LC	0%	12%	10%	5%	11%
	Algae	0%	3%	10%	13%	17%		Algae	0%	3%	10%	15%	26%		Algae	0%	3%	10%	16%	35%
20%	1G	100%	85%	80%	75%	65%	***20%***	1G	100%	85%	80%	77%	60%	***20%***	1G	100%	85%	80%	74%	49%
	LC	0%	12%	11%	10%	14%		LC	0%	12%	11%	5%	14%		LC	0%	12%	10%	7%	14%
	Algae	0%	3%	10%	15%	22%		Algae	0%	3%	10%	18%	26%		Algae	0%	3%	11%	19%	36%
25%	1G	100%	86%	81%	74%	56%	***25%***	1G	100%	86%	81%	74%	52%	***25%***	1G	100%	86%	81%	73%	52%
	LC	0%	12%	11%	10%	14%		LC	0%	12%	11%	10%	14%		LC	0%	12%	8%	8%	14%
	Algae	0%	3%	8%	16%	30%		Algae	0%	3%	8%	17%	35%		Algae	0%	3%	11%	19%	34%
30%	1G	100%	85%	80%	72%	44%	***30%***	1G	100%	85%	80%	71%	35%	***30%***	1G	100%	85%	80%	70%	35%
	LC	0%	12%	11%	9%	12%		LC	0%	12%	11%	9%	12%		LC	0%	12%	9%	9%	12%
	Algae	0%	3%	10%	19%	43%		Algae	0%	3%	10%	20%	53%		Algae	0%	3%	12%	21%	53%
35%	1G	100%	85%	76%	67%	39%	***35%***	1G	100%	85%	76%	67%	39%	***35%***	1G	100%	85%	76%	68%	39%
	LC	0%	12%	12%	9%	9%		LC	0%	12%	12%	9%	9%		LC	0%	12%	12%	9%	9%
	Algae	0%	3%	12%	24%	52%		Algae	0%	3%	12%	24%	52%		Algae	0%	3%	12%	23%	52%

Tableau 4. Evolution des parts de marché des différentes filières de production de biocarburant : première génération (1G), lignocellulosique (LC), et troisième génération (Algae).Source [26]

3.3 LE NEXUS EAU-ENERGIE

Les externalités des systèmes énergétiques sont multiformes et nous en abordons maintenant une troisième déclinaison dans le cadre de ce mémoire : les interactions entre les ressources en eau (disponibilité en quantité et qualité suffisante) et les systèmes énergétiques.

3.3.1 DESCRIPTION DE LA PROBLEMATIQUE

L'eau et l'énergie sont deux ressources vitales au fonctionnement de nos sociétés aussi bien pour nos besoins physiologiques que pour les différents secteurs d'activité économique. Ce sont aussi deux ressources pour lesquels les enjeux de soutenabilité et la question du changement climatique requièrent une démarche prospective. Enfin, leurs liens structurels sont de plus en plus reconnus et formalisés dans le concept de nexus eau-énergie. Les grandes lignes de cette interdépendance sont intuitives ; elles peuvent être synthétisées comme suit :

- Les ressources en eau douce qui représentent environ 1 % des ressources en eau globales font face à des prélèvements en croissance continue. A l'échelle mondiale, les usages domestiques représentent 11 % des prélèvements contre 19 % et 70 % pour les usages industriels et agricoles [43] [44] [45]. Les eaux de surfaces ou souterraines sont extraites par pompage, transportées dans des réseaux d'eau et traitées avant leur mises à disposition dans les différents secteurs. En aval, les eaux usées sont ensuite traitées puis recyclées ou retournées aux milieux naturels. Toutes ces étapes mobilisent de l'énergie.
- Les ressources en eau sont inégalement réparties. Des situations de rareté absolue ou des conflits entre usages de l'eau sont de fait observées dès aujourd'hui pour les zones en

stress hydrique. On parle, pour une région donnée, de stress hydrique lorsque les ressources annuelles disponibles sont inférieures à 1700 m^3 par personne, de pénurie pour un seuil de 1000 m^3 et de pénurie absolue pour un niveau de 500 m^3 par personne. Les enjeux de l'accessibilité à l'eau sont considérables avec 1,8 milliards de personnes potentiellement en situation de pénurie absolue à l'horizon 2025 (pour 2/3 de la population mondiale en situation de stress hydrique) [46].

- Plusieurs ressorts de cette pression anthropique sur les ressources en eau resteront valides sur le long terme. Sur le siècle dernier, la FAO estime [47] ainsi que la demande en eau a augmenté deux fois plus vite que la population. La Figure 10 montre que les prélèvements d'eau douce par habitant reflètent pour partie les écarts de richesse matérielle des états. La croissance démographique, le développement de l'industrie et l'aspiration à un confort matériel accru vont dès lors poser des défis pour la gestion des ressources en eau.

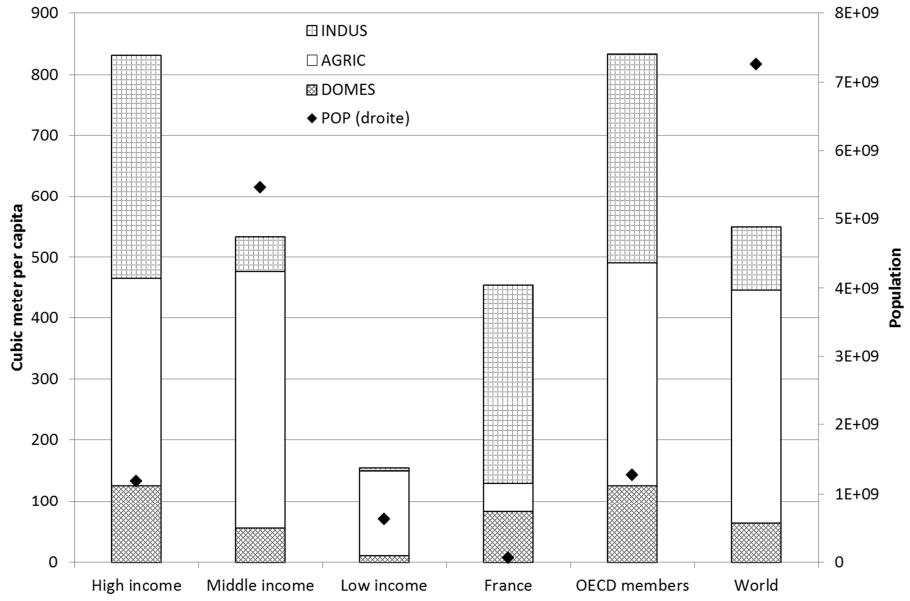


Figure 10. Prélèvements en eau douce par habitants. Données FAO-Banque mondiale

- Face au problème d'allocation posé par la rareté des ressources en eau, plusieurs solutions techniques sont proposées. Elles visent à réaliser des économies d'eau à qualité de service constante (irrigation goutte-à-goutte, réducteurs de pression), à accroître la productivité de l'eau à usage agricole[22] (rendement par m^3 d'eau), ou encore à accroître la ressource primaire en mobilisant des ressources dites non conventionnelles (recyclage des eaux usées, dessalement d'eau de mer).
- Cette dernière option connaît un développement rapide. Le volume d'eau dessalée a ainsi cru de 25 % sur les cinq dernières années pour atteindre en 2016 une capacité journalière de 86,8 millions de m^3 [48]. Cependant, le dessalement reste un procédé très

[22] La réduction des pertes agricoles ou le commerce de denrées alimentaires constituent aussi d'autres options de gestion des situations de pénuries d'eau.

énergivore qui nécessite un apport d'énergie compris entre 3,5 et 4 kWh par m^3 d'eau aujourd'hui et un objectif de long terme de 2 à 2,5 kWh par m^3 [49] [50].

- De manière symétrique, l'eau joue un rôle important dans les systèmes énergétiques et en particulier pour la production d'électricité. L'eau est la première source d'électricité renouvelable. A travers les centrales hydrauliques elle fournit 16 % de la production électrique mondiale. La disponibilité de ressources en eau est aussi critique comme source froide pour les centrales thermiques. Enfin, les procédés de captures et de séquestrations de CO_2, le solaire à concentration ou la production de biocarburant sont des exemples de solutions de décarbonation des systèmes énergétiques qui induisent en retour une augmentation des besoins en eau.

3.3.2 VERROUS ET ENJEUX POUR LA MODELISATION

Les verrous scientifiques sur ce sujet tiennent à un développement en silos des modèles traitant de chacune de ces problématiques. La diversité de ceux liés à l'énergie a été présentée précédemment. La question centrale des modèles dédiés à l'eau est la représentation du cycle hydrologique et l'expression de bilan comptables équilibrés entre l'atmosphère, les océans et les masses continentales. Les principaux mécanismes en jeu sont l'évapotranspiration des plantes et de toute surface (sols, océans) vers l'atmosphère, les précipitations et les écoulements à la surface (ruissellement et infiltration). Les efforts de modélisation vont permettre de développer des bases de données adéquates pour chacun de ces phénomènes et de formaliser les liens entre les cycles hydrologiques et la production agricole en particulier. Dans un processus similaires à celui conduisant à la multiplicité des modèles énergétiques, plusieurs modèles dédiés [23]vont être développés, IMPACT-WATER, PODIUM, WATERSIM, WATERGAP, LPJmL… En parallèle, des formes réduites de ces bilans en eaux sont utilisées dans des analyses intégrées de type IAM [51] [52].

Les besoins en eau n'étaient de fait pas la préoccupation centrale des modèles énergétiques à leur développement et réciproquement la notion de besoin en énergie n'était pas centrale pour l'étude des bilans hydrologiques. Cette problématique des interactions des ressources eau et énergie vient donc se superposer aux préoccupations de modélisation traditionnelles. Elle est résumée par la Figure 11.

[23] Du fait de grandes différences à l'intérieur d'un même territoire, l'échelle la plus pertinente pour évaluer les bilans en eau est celle des bassins versants. Les modèles hydrologiques posent de fait des problèmes de réconciliation entre échelles géographiques analogues à celles des modèles climatiques ou des modèles systèmes énergétiques.

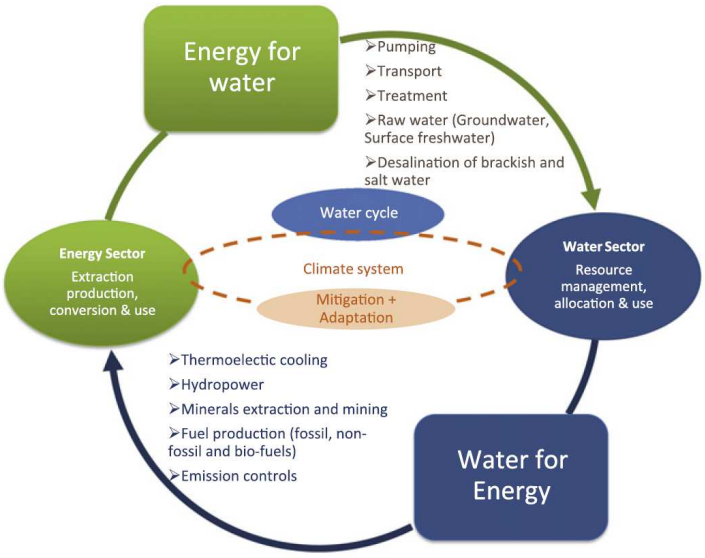


Figure 11. Les composantes du nexus Eau-Energie. [53]

Le premier enjeu va donc être topologique et implique de modifier la structure logique des modèles pour permettre une représentation explicite des flux en eau et en en énergie. S'agissant d'un sujet d'étude récent, le second enjeu va être celui des échelles d'analyse. Pour quelles questions particulières élaborer un modèle et quel niveau d'approximation retenir ? Enfin l'évolution dans le temps des caractéristiques technico-économiques des solutions techniques et des ressources disponibles ouvrent à la dimension prospective de cette interaction.

3.3.3 CONTRIBUTION

Dans le cadre de mes travaux de recherche ces interrogations ont été abordées dans des publications présentées succinctement ci-dessous. La démarche commune va être d'évaluer dans quelle mesure l'eau apparait comme un critère déterminant des choix technologiques dans les systèmes énergétiques. Nos systèmes énergétiques seront-t-ils modifiés par une double contrainte énergie et eau ?

- *L'ENERGIE POUR L'EAU*

La problématique des besoins en énergie pour l'approvisionnement en eau a été abordée dans un travail mené avec Aurélie Dubrueil, Stéphanie Bouckaert, Sandrine Selosse et Nadia Maïzi [53] pour la région du Moyen-Orient. Le premier apport de cette étude est topologique à travers l'intégration d'un système eau de référence (Figure 12) connecté à la description du système énergétique classique dans un modèle TIMES. Le modèle proposé part d'une offre primaire qui distingue l'utilisation directe d'eau pluviale, les « gisements » d'eau douce de surface ou souterraine, et les ressources non conventionnelles (eaux salées ou saumâtres, eaux usées et eau drainées). Les données utilisées proviennent de Aquastat, la base de données statistique sur l'eau de la FAO. Différentes technologies permettent ensuite de convertir ces ressources brutes en ressources mobilisables. Ces procédés qui nécessitent un apport en électricité matérialisent le lien avec le système énergétique de référence. Ce système eau de référence inclut des mesures

d'économie en eau dans le secteur agricole. Trois procédés d'irrigation ont été décrits avec des rendements exprimés en m^3 d'eau fournie par m^3 d'eau mobilisée. Enfin, les demandes en eau des différents secteurs sont projetées sur la base de taux de croissance annuel moyens issus de la littérature.

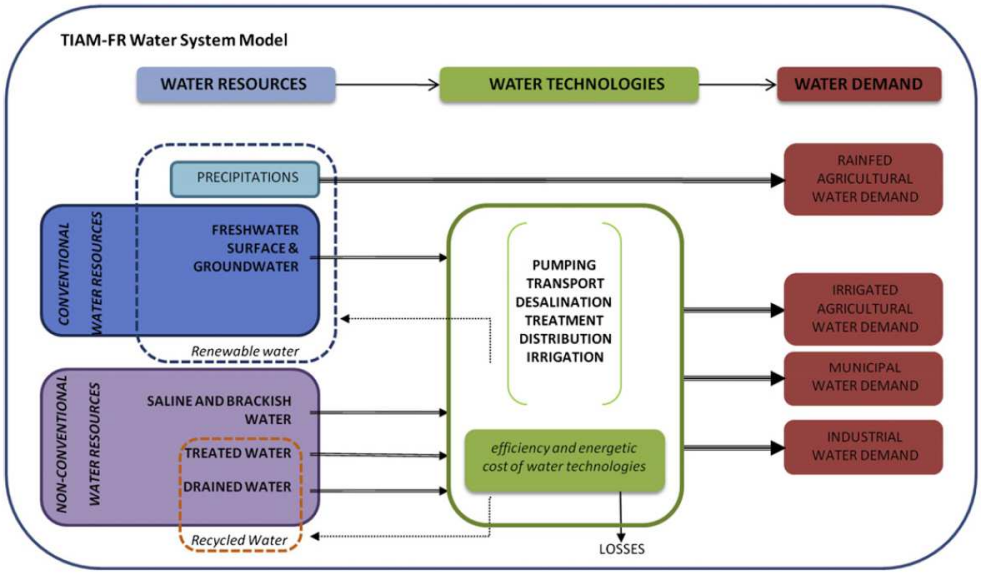


Figure 12. Topologie du Système Eau de Référence [53]

L'intérêt de cette représentation a été mis en évidence en comparant les résultats d'un modèle standard sans prise en compte des besoins énergétiques liés à la demande en eau et ceux du modèle étendu. Cette étude met en évidence qu'en dépit d'une disponibilité limitée en ressource en eaux conventionnelles au moyen orient, la demande en eau peut être satisfaite mais au prix d'une augmentation importante des besoins électriques.

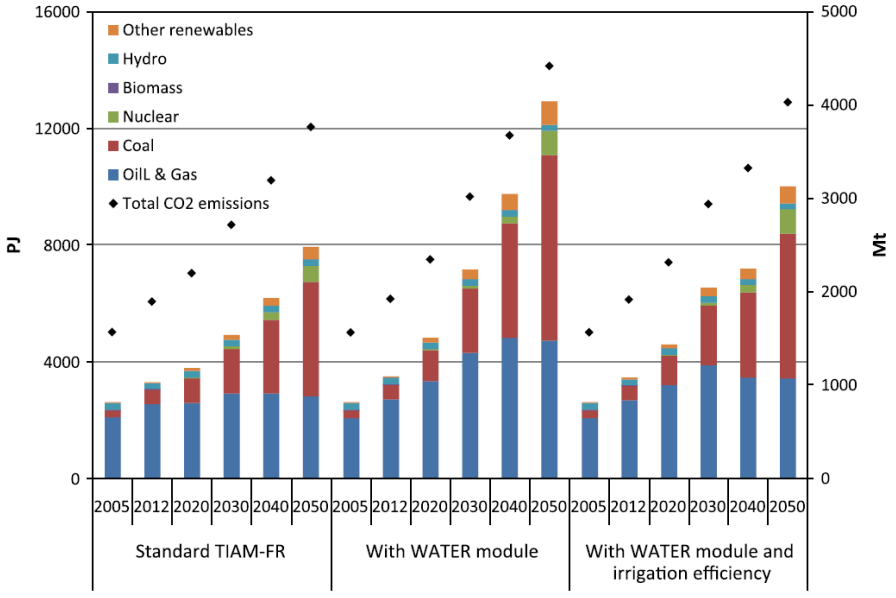


Figure 13. Influence de la prise en compte des besoins en eau sur l'évolution du mix électrique [53]

La Figure 13 décrit les changements induits sur le mix de production électrique et en termes d'émissions de CO_2 pour le système énergétique dans son ensemble. Les besoins pour la mobilisation de ressources non conventionnelles augment progressivement pour représenter 39 % de la demande électrique totale. Cette étude montre aussi le potentiel d'efficacité énergétique disponible avec une irrigation plus efficace. Avec des procédés d'irrigation standard (50 % de rendement en eau), la consommation en énergie croit trois fois plus vite que la demande en eau. Ce ratio est réduit à deux lorsqu'une irrigation localisée plus efficace est introduite (86 % de rendement en eau).

- *L'EAU POUR L'ENERGIE*

La problématique des besoins en eau pour l'énergie a été abordée dans des travaux menés avec Stéphanie Bouckaert, Sandrine Selosse et Nadia Maïzi [54]. Les enjeux de modélisation portent plus particulièrement sur l'utilisation d'eau pour les besoins de refroidissement des centrales thermiques. Ici encore un premier apport est topologique. Dans un modèle TIMES classique une centrale électrique est caractérisée par ses inputs en énergie et son rendement. Pour intégrer les besoins en eau, une première approche consiste alors à affecter à chaque centrale électrique deux coefficients qui décrivent les prélèvements (WWE) et la consommation d'eau (WCE). L'approche proposée introduit plus de flexibilité dans la définition des systèmes futurs. Elle s'appuie sur une modélisation plus explicite de la quantité de chaleur à évacuer (liée au rendement de la centrale) et des différents procédés de refroidissement. Cette approche plus souple permet ainsi d'isoler les différentes mesures d'économie d'eau et de différentier les consommations électriques supplémentaires.

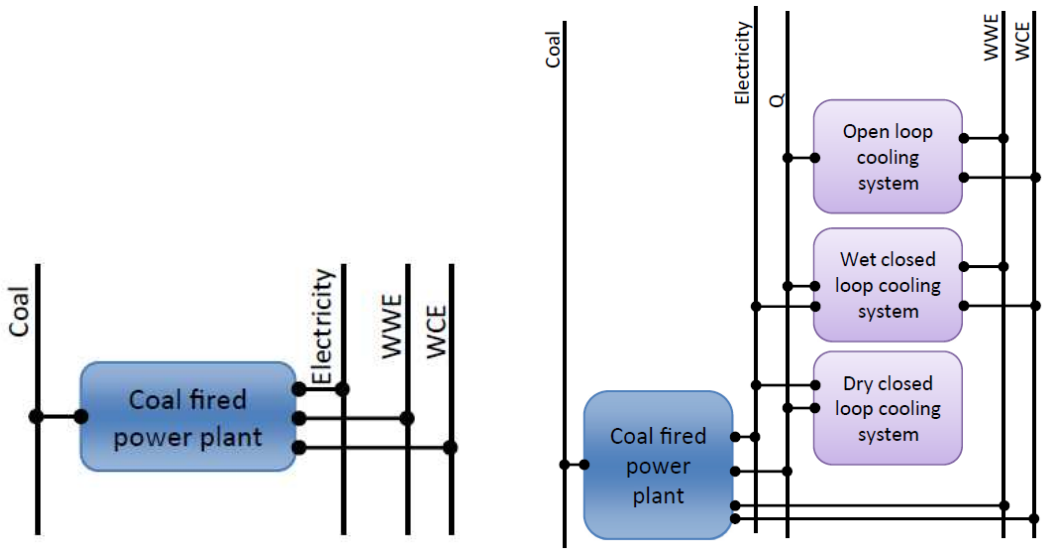


Figure 14. Approches de modelisation des besoins en eau des centrales thermiques dans des modeles times : gauche (simplifiee), droite (flexible). Source [54]

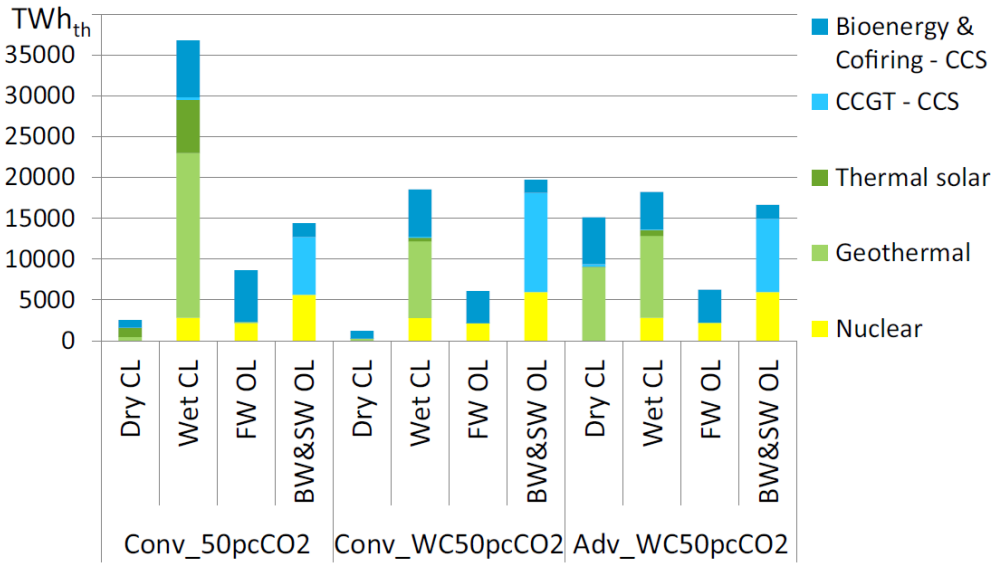


Figure 15. Illustration de l'allocation des systèmes de refroidissement des centrales électriques à l'horizon 2050 pour différents scénarios de division par deux des émissions de CO_2 : sans contrainte eau (Conv_50pcCO_2), avec un volume constant de consommation d'eau douce et une attribution fixe des besoins en eau des centrales (Conv_WC50pcCO_2), et avec un volume constant de consommation d'eau douce et une modélisation flexible des besoins en eau des centrales (Adv_WC50pcCO_2). [54]

Dans [54], cette méthodologie est implémentée dans le modèle TIAM-FR dont le périmètre géographique couvre les systèmes énergétiques de 15 grandes régions du monde. Dans cette étude plusieurs scénarios ont été analysés afin de mettre en évidence les effets de différentes mesures et l'apport d'une modélisation plus flexible des besoins en eau : une obligation des systèmes de refroidissement à boucle fermée dans le secteur électrique, une contrainte de division par deux des émissions mondiales de CO_2 seule, une double contrainte sur les émissions de CO_2 et sur la quantité d'eau consommée par les centrales. La Figure 15 illustre les différences de choix de systèmes de refroidissement à l'échelle mondiale pour trois scénarios de division par deux des émissions de CO_2.

IV. APPROFONDIR LA COMPREHENSION DES ENJEUX DE TRANSITION ENERGETIQUE PAR D'AUTRES APPROCHES DE MODELISATION

La modélisation n'est dans l'absolu qu'une mise en cohérence dans un cadre formel de liens logiques et d'hypothèses. Elle est ainsi simplification et requiert donc de se laisser questionner de nouveaux lorsque de nouvelles préoccupations surviennent. Les sections précédentes ont illustré cette dynamique pour les modèles d'optimisation de systèmes énergétiques de type TIMES. Dans le cadre de mes activités de recherche, je me suis aussi intéressé à trois problématiques liées au système énergétiques et pour lesquelles les échelles de représentation pertinentes nécessitaient des modèles dédiés.

4.1 RECONSTITUTION DE BILANS ET SCENARIOS ENERGETIQUES A L'ECHELLE URBAINE

Les travaux décrits ici portent sur la caractérisation de bilans énergétiques par usages à l'échelle urbaine à des fins d'analyse de stratégies énergétiques. Mes activités de recherche sur ce sujet ont été conduites dans le cadre du projet européen CitInES de 2011 à 2014.

4.1.1 DESCRIPTION DE LA PROBLEMATIQUE

Les villes sont des maillons essentiels des politiques de transition énergétique. Elles concentrent aujourd'hui plus de 54 % de la population mondiale, consomment 75 % de l'énergie primaire et sont responsables de 50 à 60 % des émissions directes [55] de gaz à effet de serre. Cette dimension locale est d'ailleurs en germe dès le sommet de la terre de Rio de 1992 qui, dans l'article 10 des Agendas 21 [56], promeut «le principe de la délégation des pouvoirs dans le sens d'une décentralisation plus poussée ».

Plusieurs initiatives tendent concrètement à faire des villes des leaders dans le suivi opérationnel des politiques environnementales. En Europe la convention des maires a été initiée en 2008. Elle est aujourd'hui ratifiée par plus de 7000 autorités locales. Un de ses objectifs opérationnels initiaux était l'élaboration de plans d'actions locaux visant à atteindre en 2020 les objectifs analogues à ceux du paquet climat de l'UE 2007 : réduire de 20 % les émissions de gaz à effet de serre par rapport à 1990, introduire une part de 20 % des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie finale, et une amélioration de l'efficacité énergétique de 20 %. Le projet CitInES financé dans le cadre du programme FP7 avait pour objectif le développement d'outils permettant aux villes de définir et de suivre l'implémentation de leur stratégie énergétique, et ce en particulier pour deux villes italiennes signataires de la convention des maires : Bologne et Cesena.

Cependant, l'objectif de long terme de l'Union Européenne est beaucoup plus ambitieux dans sa stratégie vers une économie bas-carbone [57] et vise une réduction de 80 % des émissions de GES d'ici à 2050. Nous sommes à moins de 40 ans de cette échéance. Cet objectif s'il est effectivement implémenté, devrait transformer profondément la façon dont l'énergie est produite et utilisée en Europe : une électricité décarbonée, 80 à 90 % de réduction des émissions

de GES dans le secteur des bâtiments par rapport à 1990, 61 % à 74 %dans le secteur des transports (hors Transport maritime) [58]. Ces cibles ambitieuses doivent également trouver un écho au niveau local, ce qui implique une approche beaucoup plus globale du système énergétique et une compréhension beaucoup plus fine des possibilités d'action. Au-delà du suivi des objectifs des politiques définies pour l'horizon 2020, le projet CitInES incluait un volet long terme dont j'ai assuré le pilotage.

4.1.2 VERROUS ET ENJEUX POUR LA MODELISATION

Plusieurs travaux de recherche ont abordé des problématiques similaires pour différentes villes. Ces travaux peuvent être différentiés [59] selon l'accent mis sur : la pénétration d'électricité renouvelable, la simulation des caractéristique du parc de bâtiment, la simulation de l'impact de l'adoption d'un choix technologique particulier (micro-cogénération, éclairage publique). Dans le cadre du projet CitInES le principal verrou était l'absence d'une base de données suffisamment détaillée des consommations d'énergie. L'un des objectifs était notamment d'aboutir à une différenciation par quartiers et par époques de construction des bâtiments. Un second verrou résidait dans le fait qu'aucune réflexion de très long terme n'était disponible sur la question de l'énergie. Il a donc été nécessaire de modéliser l'évolution des besoins de mobilité et des performances thermiques du stock de bâtiment. Ces verrous sont généralisables à la plupart des autorités locales qui, engagées dans le processus politique d'adoption d'un plan d'action, n'ont pas de cartographie suffisamment fine des usages de l'énergie sur leur territoire.

4.1.3 CONTRIBUTION

Dans le cadre de mes travaux cette question a été abordée pour les villes de Bologne et de Cesena. Dans [59] l'analyse plus poussée effectuée pour la ville de Bologne est décrite. Bologne a une population de 380 000 habitants et est la capitale de la région Emilie-Romagne en Italie. La ville a une longue histoire d'initiative de planification énergétique locale : en 1996 elle signe la Charte d'Aalborg, en 2007 un premier plan énergétique urbain est élaboré, de 2008 à 2011 elle conçoit son plan d'action pour l'énergie durable dans le cadre de la Convention des Maires avec pour objectif (approuvé par la municipalité) une réduction de 20 % des émissions de CO_2 en 2020 Par rapport à 2005. Cette analyse a permis d'explorer plusieurs scénarios de décarbonation ambitieux à partir d'un bilan géographique détaillé, d'une projection des besoins et de la simulation de substitution technologiques.

Le bilan reconstitué désagrège les consommations d'énergie suivant les 9 districts et 18 quartiers de la ville de Bologne. Pour chaque échelle géographique, 8 sources d'énergies, 7 usages finaux et 3 secteurs sont différentiés. Enfin, la distinction des ensembles bâtis en 8 périodes de construction a permis de prendre en compte la spécificité de chaque zone en termes de performance thermique. La Figure 16 illustre la désagrégation obtenue.

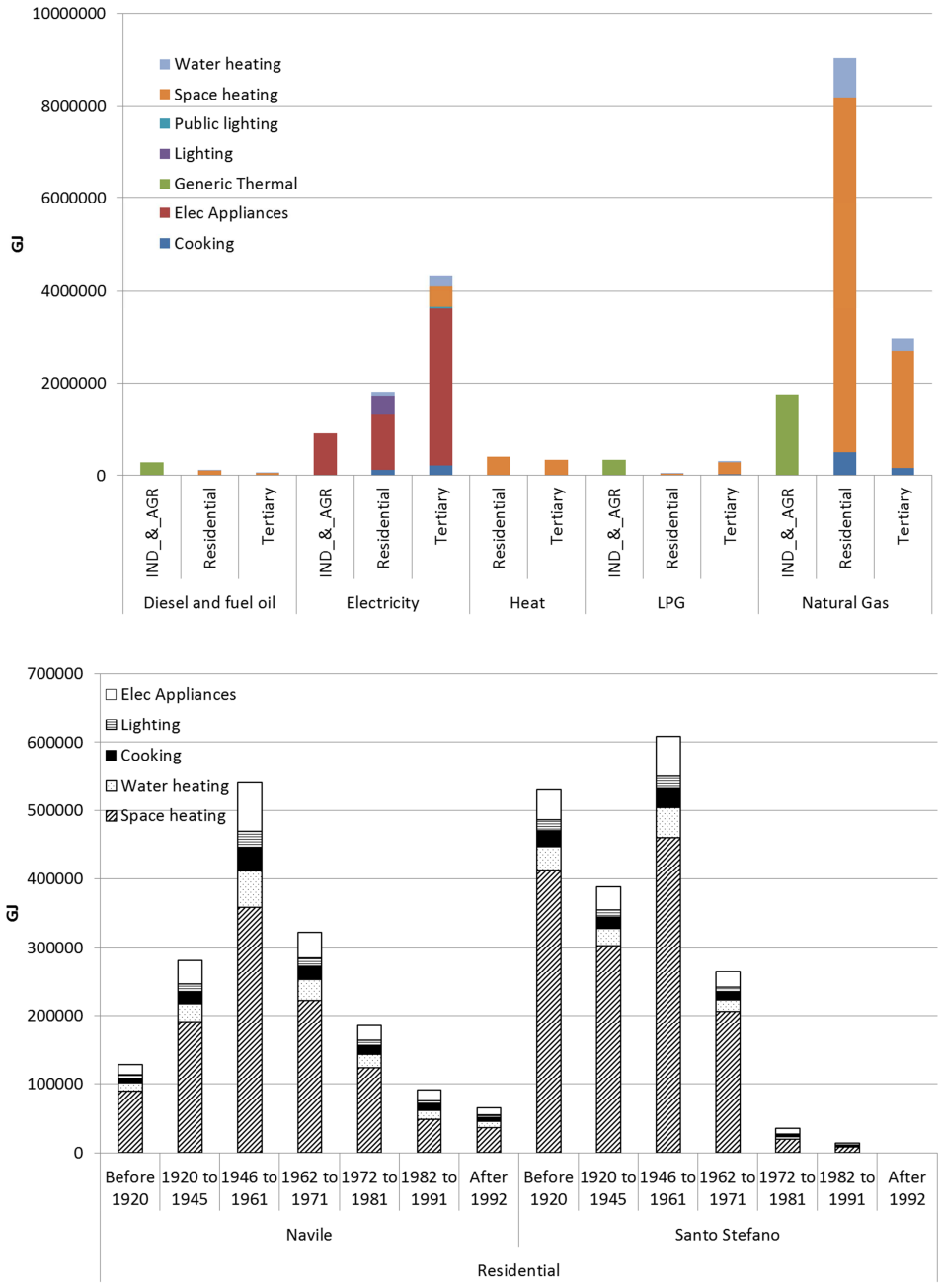


Figure 16. Reconstitution des consommations d'énergie finale par usages, par secteur (haut) et par période de construction (bas) pour la ville de Bologne

La méthodologie utilisée pour cette reconstitution repose sur l'utilisation de données SIG détaillées fournies par la vile de Bologne (nombre de bâtiments par époque de construction) et l'appariement avec des typologies de bâtiments (et des performances thermiques associées) telles que définies dans le cadre du projet TABULA [60]. Ces bases de données permettent de définir une distribution géographique des surfaces et des besoins thermiques qui sont ensuite agrégés à l'échelle des quartiers. Pour les usages cuisson et eau chaude sanitaire, un besoin

unitaire par habitant est estimé. La répartition à l'intérieur de chaque zone est alors tirée de la répartition de la population.

La projection des demandes de service des ménages transcrit ensuite l'évolution de la population, du parc bâti et de la demande de mobilité et de l'activité économique. Pour le secteur industriel elle est associée à la croissance économique. Dans le cadre de cette étude un modèle de projection des besoins de chauffage et un modèle de mobilité ont été proposés. Le modèle de dynamique du parc possède quatre principaux moteurs : la distribution des bâtiments existant (surface typologie, période de construction) pour chaque zone, le taux de démolition par période de construction et zone (permettant par exemple d'interdire les démolitions dans le centre historique), la demande de surface supplémentaire à chaque horizon, et les performances des nouveaux bâtiments. La demande de mobilité (Figure 17) s'appuie quant à elle sur l'évolution de la population et la demande de déplacement par tranche d'âge. Les données sont issues d'une enquête transport italienne et de la base de données MCD (Mobility in Cities Database) de L'Union Internationale des Transports Publics pour la ville de Bologne.

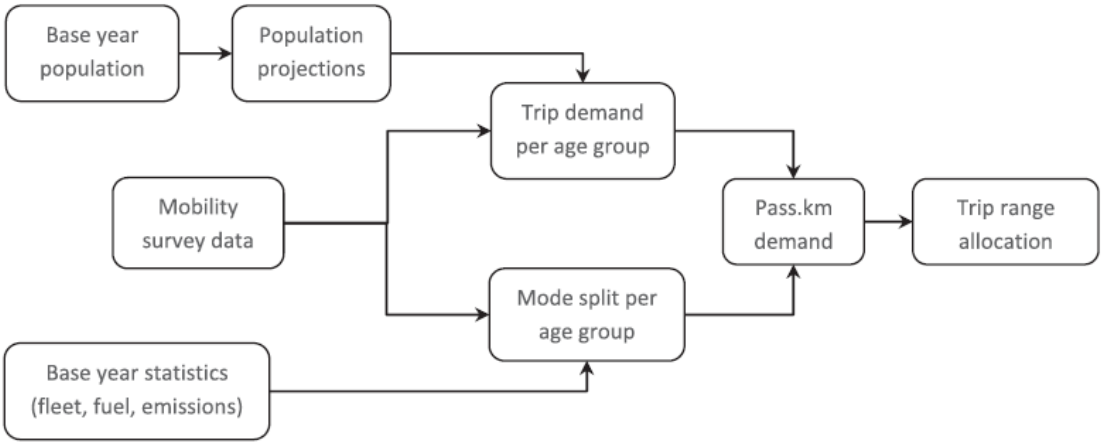


Figure 17. Processus de détermination des besoins de mobilité

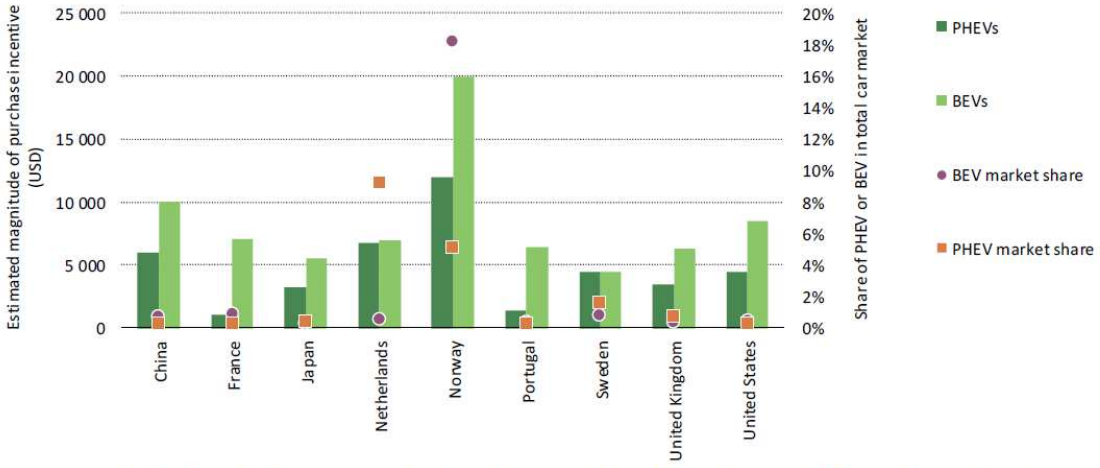
Plusieurs scénarios de base portant sur 5 dimensions (démographie, croissance économique, besoin en service utile, options technologiques individuelles, contenu CO_2 du kWh électrique) identifiées comme critiques ont ensuite été simulés. Dans le cadre du projet CitInES une approche combinatoire visant à combiner et simuler un ensemble d'options discrètes a été préférée. Ce choix permettait de conserver le niveau de désagrégation de la base de données, et de montrer, dans le timing du projet, comment des jeux de mesures (sur les bâtiments et/ou sur les sources mobiles dans les transports) pouvaient être combinés pour atteindre des niveaux de réduction donnés.

4.2 CARACTERISATION DE PROFILS DE CHARGE DE VEHICULES ELECTRIQUES

La seconde thématique abordée dans cette section est celle de l'estimation de profils de recharge de véhicules électriques à usage individuels. Les travaux associés ont été conduits dans le cadre du projet ERANET EV-STEP dont j'ai assuré la coordination de 2012 à 2015.

4.2.1 DESCRIPTION DE LA PROBLEMATIQUE

En France, 27,6 % des émissions de gaz à effet de serre totale et 38 % des émissions liées à la combustion d'énergie proviennent du secteur des transports. Sur la période 1990-2013, ceci se traduit par une augmentation absolue de 9,5 % qu'expliquent une demande toujours croissante de mobilité et une forte dépendance aux produits pétroliers. Dès lors, le développement de motorisations alternatives apparaît comme une nécessité (aux côtés d'un effort de maîtrise de la demande de mobilité) pour atteindre les ambitions d'une division par 4 de l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre françaises. Les divers mécanismes incitatifs adoptés dans différents pays pour le développement du véhicule électrique s'inscrivent dans ce cadre (Figure 18). Pour la France, les objectifs affichés dans le cadre de la PPE et de la loi de transition énergétique sont considérables : passer de 16000 à 7 millions de bornes de recharge d'ici 2030, pour un parc de 4 ,5 millions[24] de véhicules électriques ou hybrides rechargeables en 2030 (contre environ 100000 véhicules aujourd'hui).



Note: estimates for the Netherlands are calculated as the difference between the tax paid by a BEV and a PHEV emitting 50 g CO_2/km and the average of the tax paid by a gasoline and a diesel car emitting 130 g CO_2/km. Incentives in Norway are based on an average electric car cost (before VAT) of USD 30 000.

Figure 18. Subventions au véhicule tout électrique ou hybride rechargeable en 2015. Source Global EV Outlook 2016 [61]

La recharge des véhicules et son impact sur le profil d'appels de puissance électrique posent cependant des challenges opérationnels inédits pour les réseaux électriques. Les ordres de grandeurs d'un appel de puissance équivalent allant d'un chauffe-eau domestique pour une recharge lente (8 h) par véhicule, à un quartier pour une recharge accélérée (30 min) permettent de mesurer l'enjeu du pilotage de la recharge [62]. D'un point de vue utilisateur la recharge rapide rapproche les conditions de recharge du véhicule électrique de celles des véhicules thermiques tandis que du point de vue du gestionnaire du réseau la recharge lente est à privilégier. La compréhension de l'allure du profil de recharge est ainsi déterminante pour une intégration de la mobilité électrique dans le système électrique. Je m'y suis intéressé dans le

[24] On peut noter, comme ordre de grandeur, que le parc mondial de véhicules électriques et hybrides recharges est estimé à 1,2 millions en 2015 dont près de 60 % en Chine et aux Etats-Unis.

cadre du projet EV-STEP qui avait pour objectif d'ensemble, l'étude des conditions techniques et économiques de développement de la mobilité électrique aux horizons 2030 et 2050.

4.2.2 VERROUS ET ENJEUX POUR LA MODELISATION

Les principaux verrous tiennent encore une fois à la nature hybride du véhicule électrique comme innovation technique à l'interface de deux systèmes traditionnellement isolés. Le véhicule électrique est d'abord un mode de transport qui doit permettre de satisfaire une demande de mobilité formulée comme un ensemble discret de déplacement dans le temps. Cet enjeu d'intégration dans le système des mobilités pose d'abord la question de l'énergie disponible dans les batteries. Du point de vue du réseau de distribution électrique, le point critique n'est pas tant l'énergie embarquée que l'appel de puissance induit par une flotte de véhicule électrique. Le couplage entre ces deux systèmes est alors réalisé par des bornes variées autorisant plusieurs intensités de recharge (et donc durées des périodes de recharges). L'enjeu pour la modélisation est ici de déterminer des profils de recharges horaires ou infra-horaires permettant de satisfaire ces différentes contraintes.

Plusieurs analyses de profils de recharge de véhicules électriques existent dans la littérature. Pour la France le RTE propose [63][64] trois profils horaires types pour la recharge de véhicules électriques. A l'échelle européenne le JRC [65] simule de même des profils de recharge pour plusieurs pays sur la base d'enquêtes de mobilité. Dans le cadre du projet EV-STEP nous avons considéré en particulier trois enjeux du développement des véhicules qui sont peu traités : la modélisation de la sensibilité des profils de charge au signal prix de l'électricité, l'intégration de plusieurs niveaux de courant de charge, la possibilité d'une restitution d'électricité au réseau dans un mode « vehicle to grid ».

4.2.3 CONTRIBUTIONS

Le modèle EV-CAP (Electric Vehicle Charging Assessment Platform) a été développé dans le cadre du projet EV-STEP pour déterminer des profils d'appels de puissance électrique et d'état de charge pour une flotte de véhicule électrique sur une journée type et pour un pas de temps de 15 min. Il a été appliqué à l'étude de profils de rechargecorrespondant aux conditions de mobilité de la région Ile-de-France. Ce travail a été mené avec Jean-Paul marmorat, Valérie Roy et Jérôme Hoüel.

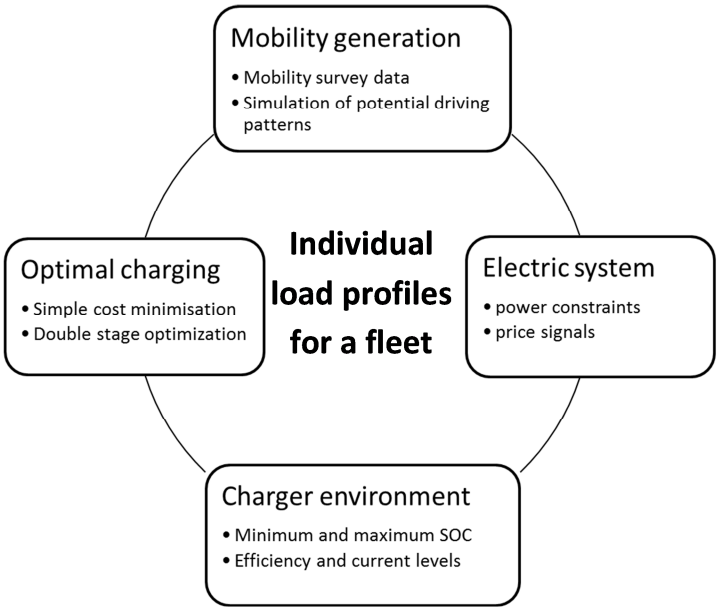


Figure 19. Sous-modules du modèle EV-CAP

La Figure 19 décrit l''architecture du modèle EV-CAP. Le module de génération des besoins de déplacements définit un planning de déplacement pour chaque véhicule de la flotte caractérisé par : un nombre de déplacements, l'heure de départ de chaque déplacement, sa distance et l'énergie nécessaire. La méthodologie [66] repose sur une analyse statistique des données de l'Enquête Nationale Transports et Déplacements 2008 afin d' extraire, pour une zone géographique d'intérêt, une distribution des nombres de déplacements et des probabilités d'heure de départ selon le numéro (premier, second…) du déplacement. Le module système électrique fixe ensuite deux paramètres, le signal prix de l'électricité pour chaque pas de temps et une limite éventuelle de puissance maximale pour chaque pas de temps. Ces deux paramètres constituent dans le modèle les seuls leviers de commande (physique ou économique) des profils de charge du point de vue du réseau qui n'affecte de fait pas l'ordonnancement des besoins de mobilité. Le troisième module décrit alors les contraintes spécifiques imposées par la typologie des infrastructures de recharge : nombre maximum d'évènements de recharge, état de charge maximum et minimum autorisés, le rendement de charge, les intensités de charge, et le rendement de décharge dans le cas d'une utilisation en mode « vehicle to grid ». Enfin, le dernier module calcule le profil de charge optimale définit comme la solution d'un problème de minimisation du coût total de la recharge. Dans notre cas ce problème s'exprime comme un programme linéaire en nombre entier dont les variables de décisions sont, à chaque pas de temps, les évènements discrets de charge ou de décharge. Plusieurs formulations de ce problème ont été proposées. Nous décrivons ici succinctement la solution proposée pour tenir compte des préférences de moment de charge des utilisateurs. Elle décompose le problème global en deux : un problème initial de minimisation du coût de la recharge, et un problème secondaire de respect d'une préférence relative entre instants de charge (allure préférentielle de la courbe de charge).

- *ETAPE 1 : EXPRESSION DE LA FONCTION OBJECTIF DE REFERENCE SANS PREFERENCE*

Cette étape génère un coût minimum de recharge de référence.

$Min\left(\sum_{v\in VE}\sum_{t\in Time}\sum_{n\in Lev} b_{v,t,n} * Pc_k * Celec_t\right)$ Eq1

Avec

- $v \in VE$ l'index des véhicules de la flotte VE
- $t \in Time$, l'index des pas de temps
- $n \in Lev$, l'index du niveau de charge
- Pc_k le vecteur des niveaux de charges permis
- $Celec_t$, le signal prix de l'électricité au temps t
- $b_{v,t,n}$: la variable de décision booléenne

- *ETAPE 2 : FONCTION OBJECTIF AVEC PRISE EN COMPTE DE PREFERENCES SUR LE MOMENT DE LA CHARGE*

L'approche proposée décrit les préférences relatives comme une fonction de forme qui s'applique à la courbe d'appel de puissance. Il s'agit alors de minimiser la puissance maximale appelée tout en respectant une tolérance sur le coût total et ce, par rapport à la solution de référence.

$minimize\left(max_{on\ t}\left[\sum_{n,v\in Niv,VE} b_{v,t,n} * Pc_k * envel(t)\right]\right)$ Eq2

Sujet à

$\left(\sum_{v\in VE}\sum_{t\in Temps}\sum_{n\in Niv} b_{v,t,n} * Pc_k * Celec_t\right) \leq Sol_{ref} * (1 + Tol)$ Eq3

Avec

- $Sol_{ref,}$ la solution sans préférence
- *Tol,* la tolérance sur le coût de la recharge
- *envel(t),* l'enveloppe caractéristique des préférences

- *ILLUSTRATION DE PROFILS DE CHARGE*

Le modèle développé permet ainsi de caractériser les modifications des profils d'appel de puissance moyens par véhicule pour des configurations plus complexes. Les Figure 20 et Figure 21 illustrent l'impact de la prise en compte d'un signal prix ou de la possibilité d'une restitution d'électricité au réseau dans le cas d'une flotte de 500 véhicules. La Figure 20 montre, pour une recharge lente, les différences de profil d'appel de puissance pour une préférence forte

(tolérance de 25 % sur le coût sans préférence) ou faible (tolérance de 5 %) pour une recharge selon l'heure d'arrivée au domicile. La Figure 21 décrit les profils obtenus pour une configuration « vehicle to grid » et un signal prix dynamique d'achat et de restitution de l'électricité de type spot. Elle montre l'existence d'une possibilité d'arbitrage supplémentaire offerte par la recharge rapide et accélérée qui a pour effet de concentrer les forts appels de puissance. Cette configuration montre aussi un potentiel de restitution supérieur à 2 kW/véhicule au moment du pic du soir.

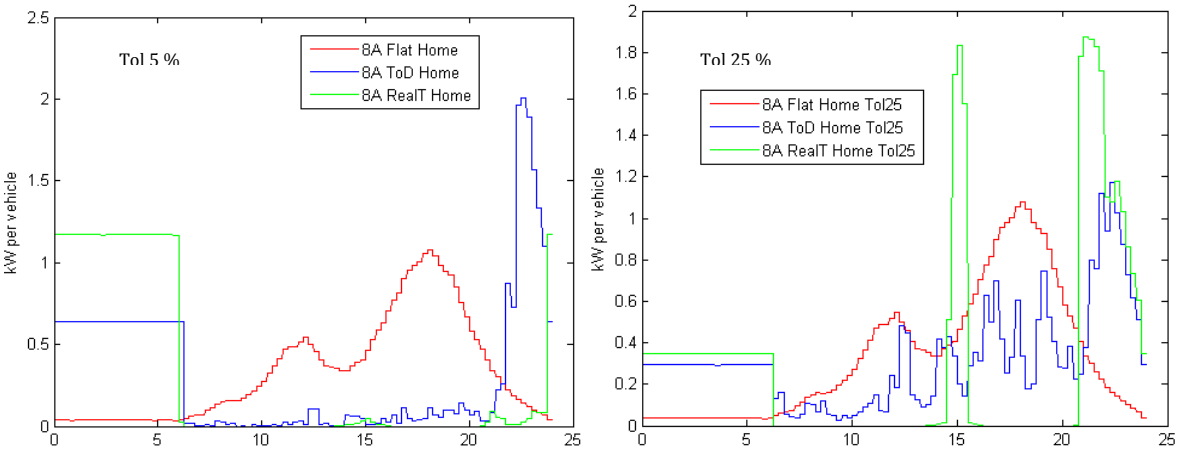


Figure 20. Profils de recharge pour une recharge lente (8A), et une recharge préférentiellement selon l'heure d'arrivée au domicile : Flat (signal prix de l'électricité indifférencié), ToD (profil de signal prix de type heure pleine/heure creuse, et RealT (profil de signal prix de type temps réel). [66]

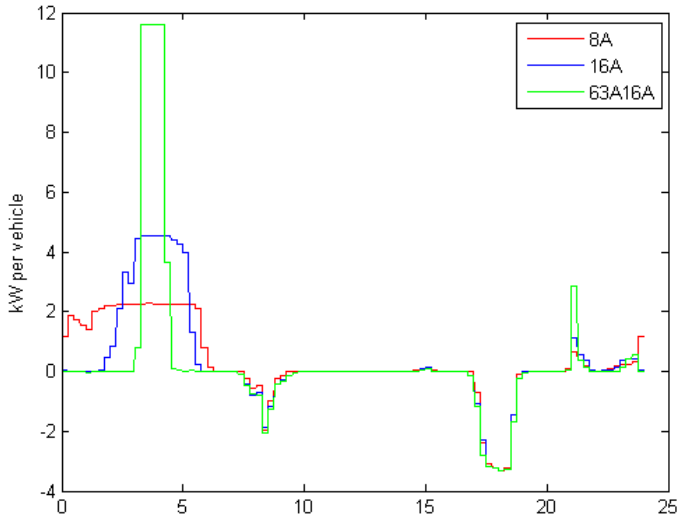


Figure 21. Profils de recharge dans une configuration « vehicle to grid » et pour un signal prix de l'électricité de type heure pleine/heure creuse. [66]

4.3 APPROCHE QUANTITATIVE DE L'IMPACT DE CHANGEMENTS DE MODES DE VIES SUR LA DEMANDE DE SERVICE ENERGETIQUES

Enfin une dernière action de recherche décrite dans cette section vise à rendre plus explicites, du point de vue des systèmes énergétiques, les sous-jacents sociétaux des scénarios d'évolution des besoins en service énergétiques utiles. Elle est conduite dans le cadre d'une thèse que je co-encadre sur les enjeux d'une modélisation quantitative des évolutions des modes de vie pour les systèmes énergétiques.

4.3.1 DESCRIPTION DE LA PROBLEMATIQUE

Les modes de vie reflètent un ensemble complexe de valeurs, de croyances, d'attitudes ou d'aspirations qui structurent et s'inscrivent dans les choix concrets de lieux de vie, de réseaux et pratiques sociales et des niveaux de consommation de différents biens et services. Dans la perspective des réflexions autour d'un développement durable, leur intérêt pour la définition de scénarios de long terme est manifeste en ce que l'énergie n'est, dans les faits, utilisée que comme moyen pour satisfaire des demandes de services dans différents secteurs d'activités. Pour les ménages en particulier, ces services utiles ne sont pas directement formulés en unités énergétiques. Une première difficulté pratique est alors de donner à ce concept issu de la sociologie, un cadrage qui en permette une traduction quantitative. La seconde est de rendre opérante, pour nos besoins futurs, des visions alternatives de mode de vie futurs. Il y a ainsi d'une part un consensus assez large et de longue date, sur l'importance des modes de vie dans l'analyse prospective et d'autre part une vraie difficulté à intégrer le surcroit de complexité inhérent à une telle entreprise dans les modèles de systèmes énergétiques existants.

Les travaux de Nasiritousia, Hjerpea et Buhr illustrent cet écart entre la reconnaissance du rôle des modes de vie et leur place effective dans les discussions dans le cadre des négociations climatiques menées sous l'égide des Nations-Unis[67]. Leur démarche compare, à travers un questionnaire, les priorités d'un panel de participants (834 répondants) selon leur typologie et le contenu des conférences organisées. Les résultats montrent que les chercheurs, les acteurs économiques et les organisations non gouvernementales expriment des vues et des priorités contrastées sur diverses thématiques : l'importance de l'innovation technologique ou des mécanismes de marché, l'approbation pour la régulation par les gouvernements... Pour ce qui est de l'importance des changements de mode de vie, l'accord le plus important est obtenu pour les chercheurs (81.2 %) tandis qu'il est de 62.2 % pour les acteurs économiques. Cependant la typologie des conférences organisées révèle selon les auteurs qu'elles concernent majoritairement la technologie et peu les modes de vie. Le sous-ensemble des sessions organisées par les chercheurs montre ainsi une part de 23 % pour la technologie, 26 % pour de nouveaux modèles économiques et seulement de 4.9 % pour les modes de vie. Cet exemple, mené dans un cadre qui ne couvre pas la totalité des efforts de recherche, illustre bien la difficulté d'une intégration des modes de vie dans l'évaluation du long terme en cohérence avec leur importance déclarée.

4.3.2 VERROUS ET ENJEUX POUR LA MODELISATION

Les modes de vie résistent par principe à la formalisation et à la prétention des modèles à en expliciter les mécanismes sous une forme suffisamment simple pour être résolue numériquement. C'est le principal verrou à la modélisation. Une approche quantitative ne peut ainsi en capter au mieux qu'une ombre portée.

L'enjeu d'un changement de nos modes de vie comme réponse non technologique aux défis posés par le développement durable a d'abord été lié à la problématique de la soutenabilité de nos niveaux de consommation et de leurs motivations. Les limites d'une acception trop simpliste de la consommation sont relevées par plusieurs auteurs. Jackson analyse en 2005 [68] les fondements sociologiques voire philosophiques d'un dépassement de l'approche utilitariste de la consommation comme source de maximisation du bien-être. A partir d'une analyse de cas, Jaeger-Erben et ses coauteurs [69] mettent en évidence, de manière plus pragmatique, cinq classes conceptuelles d'innovations sociales en matière de consommation soutenable. Leur analyse interroge entre autre les conditions d'émergence de telles innovations ainsi que celles de leur stabilisation dans l'ensemble des pratiques sociales. De même, le projet SPREAD [70] a mis en œuvre plusieurs séminaires de co-construction de modes de vies soutenable pour l'Europe de 2011 à 2012. Kuittinen et ses co-auteurs décrivent ainsi diverses propositions orientées vers une empreinte matière de 8000 kg par habitant à l'horizon 2050 [71]. Ces exemples parmi d'autres [72], [73] réhabilitent ainsi l'enjeu d'une réflexion plus poussée portant sur les alternatives aux comportements de consommation et aux modes de vie actuels.

Du côté des modèles de systèmes énergétiques la prise en compte de l'enjeu est récente et la formalisation des modes de vie dans des études prospectives est inégale. L'approche la plus commune consiste à utiliser les modes de vie comme base narrative pour contextualiser les scénarios proposés. C'est par exemple le principe de l'approche « storytelling » des scénarios du GIEC. Les modes de vie peuvent aussi être évoqués comme justification des choix de valeurs alternatives pour certains paramètres numériques des modèles (surface ou kilométrage par personne par exemple). La synthèse présentée dans Le Gallic 2015 [74] a permis de dessiner pour la France, un panorama des efforts de prise en compte de cette dimension dans les scénarios énergétiques. A l'international Sluisved et ses co-auteurs étudient l'effet de changement dans les modes de vie (pour un scénario alternatif) pour le modèle IMAGE de type IAM [75]. La méthodologie suivie repose sur la modification directe de paramètres numériques du modèle pour les secteurs résidentiels et transport : demande de chauffage et de climatisation, surface habitable, contraintes sur la part budgétaire des transports mécanisés, part modale des transports collectifs… Druckman et Jackson proposent le modèle économique LARA [76] pour l'analyse des empreintes carbone et matière des ménages anglais. La méthodologie proposée s'appuie sur une enquête budget des ménages et une segmentation en 45 catégories des ménages anglais pour estimer à une échelle géographique fine, les besoins en ressources pour un groupe de ménage donné. Enfin une étude récente considère l'introduction de « facteurs sociaux » dans un modèle technologique de type TIMES [77]. L'idée des auteurs est de décrire explicitement les campagnes de sensibilisation comme des procédés dont les sorties permettent

d'activer des mesures de conservation d'énergie (changement de type de lampes de leur étude). Le coût des campagnes d'information caractérisent alors les coûts d'investissement de ces pseudos-procédés.

Une des principales limites des approches actuelles visant à intégrer la dimension des modes de vie dans les modèles est qu'elles décrivent plus ou moins implicitement les modes de vie *pour* la politique énergétique. La dimension mode de vie reste abstraite et introduite par un nombre réduit de levier. De même la cohésion de choix de mode vie sur plusieurs dimensions (localisation, transport, consommation) n'est pas toujours vérifiée. En quelque sorte, les effets des modes de vie désirés sont formulés et formés avant les moteurs. L'enjeu du travail de recherche proposé dans la thèse de Thomas Le Gallic va alors être de tenter d'en rendre compte plus explicitement.

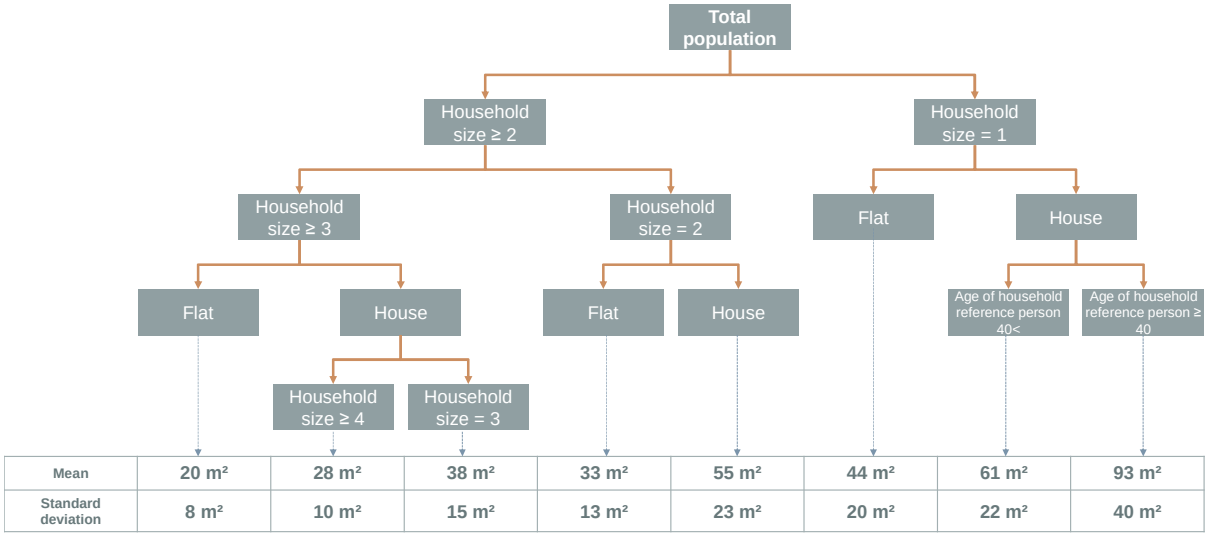
4.3.3 CONTRIBUTION

Penser les modes de vie futurs à des horizons de plusieurs décennies sous l'angle des demandes adressées aux systèmes énergétiques à quelque chose d'incongru. Envisage-t-on une sorte d'ingénierie sociale qui modifierait nos modes de vie pour les adapter sans friction aux objectifs environnementaux ? Est-on capable de normer suffisamment les modes de vie pour les capturer dans leur complexité? La réponse à ces deux questions est évidemment négative et la contribution proposée reste en premier plus utile à l'analyse des systèmes énergétiques qu'à la sociologie.

	Types of variables	Surveys				
		Time use survey	Housing Survey	National Transport and Travel Survey	Household budget survey	Population census
Who are they?	age, gender, activity status	+++	+++	+++	+++	+++
With whom do they live?	household size and composition, incomes	++	++	++	++	+++
Where do they live?	type of urban space	+++	+++	+++	+++	+++
What do they do?	frequency of different kind of activities and time spent	+++		+	+	
Where do they do it?	location of activities (at home, at work, …), to-face or virtual activity	+++		+++		
What do they have?	ownership of equipment, vehicles, furniture	++	+	+	+++	+
What do they consume?	volumes of each type of goods and services				+++	
How do they inhabit?	building type, dwelling size	+	+++	+	+	++
How do they move?	number of trips, distance and means of transport	+		+++	+	
How do they travel?	location, frequency, duration			++	+++	

Tableau 5. Enquêtes mobilisées et disponibilité de variables explicatives relatives aux modes de vie [78]

Je co-encadre dans cette perspective le travail de thèse de Thomas LeGallic qui élabore une approche statistique des changements de mode de vie basée sur l'utilisation conjointe de plusieurs enquête de grande envergure menée par l'INSEE afin de qualifier, dans le temps, des transformations de pratiques sociales à l'échelle de segments de population. Pour l'analyse du long terme, ce travail vise à répondre à une des limites des approches actuelles. Il permet de formuler et d'articuler de manière cohérente des hypothèses portant simultanément sur plusieurs marqueurs des modes de vie : localisation de ménages, revenu, activité, âge, mode de cohabitation. Le tableau ci-dessus illustre la complémentarité des différentes enquêtes mobilisées dans cette thèse pour la construction d'une base statistique cohérente et pour l'analyse des déterminants (quantifiables) associés aux modes de vie selon plusieurs dimensions. La démarche de modélisation proposée s'appuie sur cette image statistique de l'ensemble des pratiques sociales pour établir des corrélations entre variables et caractériser ainsi les modes de vies de segments homogènes de population. Elle identifie ainsi, dans une première étape, les marqueurs des différents segments à partir d'arbres de régression (Figure 22).



Mean	20 m²	28 m²	38 m²	33 m²	55 m²	44 m²	61 m²	93 m²
Standard deviation	8 m²	10 m²	15 m²	13 m²	23 m²	20 m²	22 m²	40 m²

Figure 22. Exemple d'arbre de régression pour la variable surface habitable par personne[78]

Dans un second temps, l'évolution des modes de vie sur le long terme est stimulée par deux grands mécanismes : sous l'effet de transformations structurelles liées à la démographie et à la distribution des revenus, et sous l'effet des modifications de pratiques à l'échelle de chaque segment [78] [79]. La combinaison de ces deux catégories de « moteurs » des mutations dans les modes de vie permet alors de caractériser des demandes cohérentes avec une reconfiguration plus complexe des segments de population où il ne s'agit pas de décrire un ménage moyen représentatif.

V. PERSPECTIVES DE RECHERCHE

Les activités de recherche décrites dans ce mémoire envisagent la modélisation numérique comme composante d'une démarche d'exploration de systèmes complexes et sur des horizons de long terme pour lesquels aucune expérience directe n'est possible. Pour les systèmes énergétiques ce sont des supports indispensables pour penser les conditions des transitions anticipées par les différents objectifs de politiques énergétiques. Devant la complexité des questions posées et l'évolution des connaissances produites par différentes disciplines une attitude d'ouverture et de remise en cause continu des modèles est inévitable. In fine, les modèles sont des objets conceptuels au service de l'interdisciplinarité. Mes perspectives de recherche à moyen terme portent sur les trois axes de ce bilan que sont : l'amélioration de la précision dans la description des flux et des procédés dans les différents modèles afin de mieux en identifier les sous-systèmes critiques, l'analyse des choix techniques sous l'angle des diverses formes d'externalités environnementales, et l'intégration de modèles de systèmes énergétiques et d'autres approches de modélisation pour notamment caractériser les besoins en services utiles. Certaines initiatives de recherche d'ores et déjà en cours offrent des premiers éléments de réflexions pour ces trois perspectives. La définition de nouveaux projets de recherche et la recherche de financement auprès de différents organismes permettra de les soutenir.

5.1 PERSPECTIVES DE RECHERCHE SUR LA REPRESENTATIVITE DES SYSTEMES TECHNIQUES DECRITS ET LEUR TOPOLOGIE

Dans une perspective systémique, l'identification des contraintes critiques dépend du degré de résolution du modèle de représentation utilisé. Cette première perspective de recherche s'attache ainsi à l'amélioration continue de la description des chemins technologiques et à l'analyse des modes d'interactions entre les différents sous-systèmes. Pour les systèmes électriques en particulier, l'accessibilité plus grande et à des résolutions géographiques et temporelles plus fines des potentiels et des statistiques de production des différentes filières permet d'envisager une telle modélisation.

- Dans le cadre des travaux de thèse de Jérôme Gutierrez que je co-encadre, cette perspective se traduit par la recherche d'une meilleure résolution temporelle et spatiale des modèles. A l'échelle temporelle, une des améliorations introduites concerne les contraintes de rampes horaires des moyens de génération entre deux pas de temps consécutifs. De telles contraintes ne sont pas explicitées dans les modèles TIMES classiques. Elles ont été intégrées dans un modèle TIMES dont la résolution temporelle sur chaque période distingue 24 pas de temps horaires pour deux journées types et chacun des 12 mois de l'année[80]. En ce qui concerne la résolution spatiale, l'innovation de cette thèse porte sur une modélisation de l'interaction des sous-systèmes régionaux dans le système électrique français. Un modèle TIMES multi-régional du système français est en cours de développement. Il permettra de rendre compte de la distribution spatiale des gisements d'énergie renouvelable et des perspectives d'évolution de la demande.

- Une seconde perspective abordée dans le cadre de la thèse en cours de Rémy Doudard que je co-encadre, porte sur la modélisation des options de flexibilité dans les systèmes multi-énergies et notamment sur la complémentarité entre les réseaux de gaz et les réseaux électriques. Dans la topologie des systèmes énergétiques actuels les interactions de ces deux réseaux se traduisent par une coopération dans l'usage du gaz naturel pour la génération d'électricité, et à l'inverse par une compétition entre ces deux vecteurs énergétiques pour la satisfaction des demandes finales de chaleur. Les réseaux de gaz pourraient cependant contribuer à l'optimisation du fonctionnement des systèmes électriques dans des scénarios de développement massifs de production intermittentes en valorisant les excédents de production sous forme d'hydrogène ou de gaz de synthèse. Ces nouvelles interactions pourraient en retour être injectés dans le réseau de gaz et permettre de réduire le contenu carbone du gaz. L'enjeu de recherche est ici la modélisation technico-économiques des processus impliqués et des nouvelles interactions introduites par ces filières.
- Enfin, une dernière thématique d'intérêt est celle d'une plateforme de modélisation partagée du système électrique européen permettant de mieux prendre en compte la diversité des conditions climatiques, et la variabilité horaire des productibles solaires, éoliens et hydrauliques. Comment de grands systèmes interconnectés sont impactés, coopèrent-ils, gèrent-ils la variabilité des données climatiques ? Ceci implique d'une part, une distinction de sous-systèmes climatiques et d'autre part, la prise en compte des flux échangés entre pays. L'enjeu de cette recherche est considérablement plus large que la seule modélisation TIMES et nécessite une expertise des systèmes hydrologiques et des productibles solaires ou éoliens. Un projet de recherche sur le sujet impliquant plusieurs équipes européennes, CLIM2POWER, vient d'être approuvé et va débuter fin 2017 pour une durée de 3 ans. J'y assurerai la coordination des travaux de modélisation relatifs au système électrique européen.

5.2 PERSPECTIVES DE RECHERCHE PORTANT SUR L'ANALYSE DES CHOIX SOUS L'ANGLE DES EXTERNALITES DES SYSTEMES ENERGETIQUES

La dynamique des choix technologiques dans les modèles de prospective que nous développons peut faciliter l'analyse des effets des innovations techniques sur les externalités des systèmes énergétiques. Comme nous l'avons illustré pour la filière biomasse ou pour les interactions eau et énergie, la raréfaction d'une ressource ou la modification règlementaire du périmètre retenu pour la comptabilité des impacts environnementaux ne sont pas neutres vis-à-vis des choix optimaux calculés par des modèles normatifs tels que TIMES.

- Une première perspective de recherche sur cette thématique concerne la prise en compte des transformations des systèmes énergétiques dans les analyses de cycle de vie des ensembles bâtis. Les impacts environnementaux dans le cadre d'un projet de construction peuvent être utilement abordés par l'Analyse de Cycle de Vie (ACV). Cependant, dans une ACV classique les mutations du système d'arrière-plan, ici le système électrique, ne sont pas représentées et des coefficients d'émissions statiques

sont employés. L'enjeu est de quantifier l'impact de ces mutations d'arrière-plan sur le long terme en combinant approche ACV et modélisation prospective. Une première action de recherche a été initiée en partenariat avec la Chaire Écoconception. Elle a permis de définir une proposition méthodologique et de valider l'intégration proposée sur la question du contenu CO_2 du kWh électrique en France [81]. Sur la base de cette expérience une proposition de recherche a été soumise pour permettre la poursuite de cette intégration entre démarche prospective et ACV et permettre l'implémentation opérationnelle de la méthodologie développée dans des outils diffusés largement auprès des professionnels du bâtiment.

- Par ailleurs, dans le prolongement des travaux menés sur le nexus eau-énergie une extension de la comptabilité des prélèvements et des ressources en eau aux usages industriels non énergétiques constitue la principale perspective de recherche à moyen terme. Cette extension permettra notamment d'évaluer un bilan global des usages de l'eau et de modéliser les possibilités d'économie d'eau et les potentiels enjeux d'allocations.

5.3 INTEGRATION DE MODELES : VERS DES APPROCHES GLOBALES MODE DE VIE-ECONOMIE-CHOIX TECHNOLOGIQUES

Enfin, la troisième perspective de recherche qui se dégage de mes activités de recherche est celle du besoin de structures de modélisation permettant d'intégrer plus rigoureusement les hypothèses qui structurent les demandes de services énergétiques, les activités économiques et les choix technologiques. Dans le cadre des travaux que je mène au sein de la Chaire Modélisation prospective au service du développement durable, j'ai initié une démarche "prospective France 2072", qui propose un début de réponse à ce besoin d'un cadre de mis en cohérence des différentes demandes. Cette initiative vise à étudier les leviers sociétaux, macroéconomiques et techniques de scénarios de décarbonation quasi complète du système énergétique français. La structure de modélisation proposée dans ce cadre associe trois modèles développés au Centre de Mathématique Appliquées : le modèle de représentation statistique des changements de modes de vie développé dans le cadre de la thèse de Thomas Le Gallic, le modèle input-output développé dans le cadre de la thèse de François Briens pour la détermination du niveau d'activité industrielle et tertiaire, et le modèle TIMES-FR pour l'analyse des choix technologiques.

VI. CONCLUSION

Les modèles sont des outils formels structurants pour la pensée scientifique, et des moyens utiles pour informer les choix stratégiques sur le long terme en matière d'énergie. Des décisions politiques fortes comme le fut en son temps le programme électronucléaire, ou des paris technologiques tels que celui du véhicule hybride commercial de Toyota sur un marché inexistant, constituent évidemment d'autres options possibles pour la définition de choix stratégiques liés à l'énergie. En ce sens les modèles ne sont pas indispensables. Cependant en dépit de leurs limites ce sont des instruments utiles pour une rationalisation des choix et pour une meilleure compréhension des interactions entre les différents niveaux d'action disponibles. C'est dans leur positionnement entre le formalisme mathématique, les moyens informatiques et les questions très appliquées relatives au futur des systèmes énergétiques qu'ils trouvent leur place et leur sens. A travers les différentes sections de cette deuxième partie, j'ai présenté mes activités de recherche et mes perspectives prioritaires de recherche à moyen terme. La démarche que je décris comporte de manière schématique trois directions :

- une meilleure compréhension des possibilités d'optimisation des flux et des technologies de transformation de l'énergétique dans une approche systémique ;
- un approfondissement des enjeux purement énergétiques dans la direction des multiples externalités des systèmes énergétiques environnementales ;
- une ouverture à d'autres approches de modélisation pour décrire d'une façon plus satisfaisante des problématiques qui restent aujourd'hui insuffisamment intégrées dans nos modèles.

Pour ces différentes directions la discussion des verrous et enjeux permet de situer la contribution de mes travaux et d'identifier le besoin de recherche complémentaire pour y répondre. En conclusion de ce mémoire, il convient ainsi de rappeler que c'est autour de ces préoccupations, et de cette approche de la modélisation comme démarche d'investigation, que je conçois, dans ma pratique, l'encadrement de travaux de jeunes chercheurs.

VII. REFERENCES

[1] Pfenninger S, Hawkes A, Keirstead J. Energy systems modeling for twenty-first century energy challenges. Renew Sustain Energy Rev 2014;33:74–86. doi:10.1016/j.rser.2014.02.003.

[2] Costantini V, Paglialunga E. Elasticity of substitution in capital-energy relationships: how central is a sector-based panel estimation approach? 2014.

[3] Fiorito G, Bergh JCJM van den. Capital-energy substitution in manufacturing for seven OECD countries: learning about potential effects of climate policy and peak oil. Energy Effic 2016;9:49–65. doi:10.1007/s12053-015-9349-z.

[4] Antimiani A, Costantini V, Paglialunga E. The sensitivity of climate-economy CGE models to energy-related elasticity parameters: Implications for climate policy design. Econ Model 2015;51:38–52. doi:10.1016/j.econmod.2015.07.015.

[5] Zagamé P. Modèles de l'énergie et nouvelles théories du progrès technique 2008.

[6] Bourdin J. Les incidences économiques d'une augmentation des dépenses de recherche en Europe. Sénat; 2004.

[7] Sassi O, Crassous R, Hourcade JC, Gitz V, Waisman H, Guivarch C. IMACLIM-R: a modelling framework to simulate sustainable development pathways. Int J Glob Environ Issues 2010;10:5. doi:10.1504/IJGENVI.2010.030566.

[8] Ravetz JR. Scientific Knowledge and its Social Problems. Oxford, Clarendon Press; 1971.

[9] Ravetz JR. Post-Normal Science and the complexity of transitions towards sustainability. Ecol Complex 2006;3:275–84. doi:10.1016/j.ecocom.2007.02.001.

[10] O'Lear S, Dalby S. Reframing Climate Change: Constructing Ecological Geopolitics. Routledge; 2015.

[11] Sismondo S. An Introduction to Science and Technology Studies. John Wiley & Sons; 2011.

[12] Dorfman R, Samuelson PA, Solow RM. Linear Programming and Economic Analysis. Courier Corporation; 2012.

[13] Chasseriaux J-M. « La politique énergétique française ». Rev Déconomie Ind 1983;23:268–76. doi:10.3406/rei.1983.1163.

[14] Commissariat général au développement durable. Chiffres clés de l'énergie Édition 2011 2011.

[15] Nicole Fontaine. Livre blanc sur les énergies. La Documentation française. Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie; 2003.

[16] Henri Revol. Politique énergétique de la France. 1998.

[17] Jean Syrota, Centre d'Analyse Stratégique. Perspectives énergétiques de la France à l'horizon 2020-2050 : rapports des groupes de travail de la commission Energie présidée par Jean Syrota - Volume 2 2008.

[18] Kempener R, Assoumou E, Chiodi A, Ciorba U, Gaeta M, Gielen D, et al. A Global Renewable Energy Roadmap: Comparing Energy Systems Models with IRENA's REmap 2030 Project. In: Giannakidis G, Labriet M, Ó Gallachóir B, Tosato G, editors. Informing Energy Clim. Policies Using Energy Syst. Models, vol. 30, Cham: Springer International Publishing; 2015, p. 43–67.

[19] Assoumou E, Maïzi N. The changing role of natural gas in the French energy transition, 2015, p. SDEWES2015-0374.

[20] Maïzi N, Assoumou E. Future prospects for nuclear power in France. Appl Energy 2014;136:849–59. doi:10.1016/j.apenergy.2014.03.056.

[21] Drouineau M, Maïzi N, Mazauric V. Impacts of intermittent sources on the quality of power supply: The key role of reliability indicators. Appl Energy 2014;116:333–43. doi:10.1016/j.apenergy.2013.11.069.

[22] Krakowski V, Assoumou E, Maïzi N. Enjeux d'une transition vers une production d'électricité 100 % renouvelable en France. Rev Energ 2015:381–94.

[23] Krakowski V, Assoumou E, Mazauric V, Maïzi N. Feasible path toward 40–100% renewable energy shares for power supply in France by 2050: A prospective analysis. Appl Energy 2016;171:501–22. doi:10.1016/j.apenergy.2016.03.094.

[24] Forsell N, Guerassimoff G, Athanassiadis D, Thivolle-Casat A, Lorne D, Millet G, et al. Sub-national TIMES model for analyzing future regional use of biomass and biofuels in Sweden and France. Renew Energy 2013;60:415–26. doi:10.1016/j.renene.2013.05.015.

[25] Hugues P, Rousseau J, Assoumou E. Le secteur bioénergie français. Technologies et ressources pour répondre à la demande en 2050. Rev Energ 2013;Juillet-août:249–78.

[26] Hugues P, Assoumou E, Maizi N. Assessing GHG mitigation and associated cost of French biofuel sector: Insights from a TIMES model. Energy 2016;113:288–300. doi:10.1016/j.energy.2016.06.146.

[27] Drouineau M. Modélisation prospective et analyse socio-temporelle : intégration de la dynamique du réseau électrique. Mines ParisTech, 2011.

[28] Bouckaert S. Contribution des Smart Grids à la transition énergétique: évaluation dans des scénarios long terme. Mines ParisTech, 2013.

[29] International Energy Agency. World Energy Outlook 2016 2016. http://www.iea.org/newsroom/news/2016/november/world-energy-outlook-2016.html.

[30] Hugues P. Stratégies technologique et réglementaire de déploiement des filières bioénergies françaises. phdthesis. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2015.

[31] Boiteux M. Transport: choix des investissements et coût des nuisances 2001.

[32] Quinet A. La valeur tutélaire du carbone n.d.

[33] Quinet E. Evaluation Socioéconomique des investissements publics 2013.

[34] Tol RSJ. Targets for global climate policy: An overview. J Econ Dyn Control 2013;37:911–28. doi:10.1016/j.jedc.2013.01.001.

[35] Isacs L, Finnveden G, Dahllöf L, Håkansson C, Petersson L, Steen B, et al. Choosing a monetary value of greenhouse gases in assessment tools: A comprehensive review. J Clean Prod 2016;127:37–48. doi:10.1016/j.jclepro.2016.03.163.

[36] Havranek T, Irsova Z, Janda K, Zilberman D. Selective reporting and the social cost of carbon. Energy Econ 2015;51:394–406. doi:10.1016/j.eneco.2015.08.009.

[37] van den Bergh JCJM, Botzen WJW. Monetary valuation of the social cost of CO2 emissions: A critical survey. Ecol Econ 2015;114:33–46. doi:10.1016/j.ecolecon.2015.03.015.

[38] Assoumou E, Maïzi N. Carbon value dynamics for France: A key driver to support mitigation pledges at country scale. Energy Policy 2011;39:4325–36. doi:10.1016/j.enpol.2011.04.050.

[39] DeCara S, Gousebaïl A, Grateau R, Levert F, Quemener J, Vermont B. Revue critique des études évaluant l'effet des changements d'affectation des ols sur les bilans environnementaux des biocarburants. Rapport final pour l'Ademe, mars 2012. 2012.

[40] Ahlgren S, Di Lucia L. Indirect land use changes of biofuel production – a review of modelling efforts and policy developments in the European Union. Biotechnol Biofuels 2014;7:35. doi:10.1186/1754-6834-7-35.

[41] Gohin A. Le changement d'affectation des sols induit par la consommation européenne de biodiesel : une analyse de sensibilité aux évolutions des rendements agricoles 2013.

[42] Davis R, Markham J, Kinchin C, Grundl N, Tan ECD, Humbrid D. Process Design and Economics for the Conversion of Lignocellulosic Biomass to Hydrocarbons: Dilute-Acid and Enzymatic Deconstruction of Biomass to Sugars and Catalytic Conversion of Sugars to Hydrocarbons 2015.

[43] Annual freshwater withdrawals, agriculture (% of total freshwater withdrawal) | Data n.d. http://data.worldbank.org/indicator/ER.H2O.FWAG.ZS (accessed March 22, 2017).

[44] Annual freshwater withdrawals, industry (% of total freshwater withdrawal) | Data | Graph n.d. http://data.worldbank.org/indicator/ER.H2O.FWIN.ZS/countries/1W?display=graph (accessed March 18, 2016).

[45] Annual freshwater withdrawals, domestic (% of total freshwater withdrawal) | Data n.d. http://data.worldbank.org/indicator/ER.H2O.FWDM.ZS (accessed March 22, 2017).

[46] UN-Water. Coping With Water Scarcity - Challenge of the 21st Century 2007. http://www.unwater.org/downloads/escarcity.pdf.

[47] Food and Agriculture Organization, editor. Coping With Water Scarcity: An Action Framework For Agriculture And Food Security: FAO Water Reports No 38. Food & Agriculture Organization; 2013.

[48] IDA | International Desalination Association n.d. http://idadesal.org/ (accessed March 22, 2017).

[49] Campos C. The economics of desalination for various uses n.d. http://www.rac.es/ficheros/doc/00731.pdf (accessed February 23, 2017).

[50] Nikolay Voutchkov. Desalination – Past, Present and Future. Int Water Assoc n.d. http://www.iwa-network.org/desalination-past-present-future/ (accessed February 23, 2017).

[51] Bell A, Zhu T, Xie H, Ringler C. Climate–water interactions—Challenges for improved representation in integrated assessment models. Energy Econ 2014;46:510–21. doi:10.1016/j.eneco.2013.12.016.

[52] Hejazi MI, Edmonds J, Clarke L, Kyle P, Davies E, Chaturvedi V, et al. Integrated assessment of global water scarcity over the 21st century – Part 2: Climate change mitigation policies. Hydrol Earth Syst Sci Discuss 2013;10:3383–425. doi:10.5194/hessd-10-3383-2013.

[53] Dubreuil A, Assoumou E, Bouckaert S, Selosse S, Maı¨zi N. Water modeling in an energy optimization framework – The water-scarce middle east context. Appl Energy 2013;101:268–79. doi:10.1016/j.apenergy.2012.06.032.

[54] Bouckaert S, Assoumou E, Selosse S, Maïzi N. A prospective analysis of waste heat management at power plants and water conservation issues using a global TIMES model. Energy 2014;68:80–91. doi:10.1016/j.energy.2014.02.008.

[55] Energy – UN-Habitat n.d. https://unhabitat.org/urban-themes/energy/ (accessed March 22, 2017).

[56] United Nations. United Nations Conference on Environment & Development Rio de Janerio, Brazil, 3 to 14 June 1992 AGENDA 21 1992.

[57] European Comission. A Roadmap for moving towards a competitive low carbon economy in 2050. Impact Assessment. SEC(2011)288 final. 2011.

[58] European Commission. Energy roadmap 2050 impact assessment and scenario analysis 2011.

[59] Assoumou E, Marmorat J-P, Roy V. Investigating long-term energy and CO2 mitigation options at city scale: A technical analysis for the city of Bologna. Energy n.d. doi:10.1016/j.energy.2015.06.123.

[60] Corrado V, Ilaria Ballarini, Stefano Paolo Corgnati. D6.2 National scientific report on the TABULA activities in Italy. 2012.

[61] International Energy Agency. Global EV Outlook 2016 - Beyond one million electric cars. 2016.

[62] Luc Aschard, Pierre Cochet. Les enjeux pour le réseau de distribution d'électricité 2015. http://www.driee.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/16_17_-_Jean-Luc_ASCHARD_et_Pierre_COCHET_-_ERDF_IDF_7_slides_sur_11_.pdf.

[63] RTE. édition 2011 Bilan Prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France 2011.

[64] Ile-de-France D. L'approvisionnement énergétique du Grand Paris (séminaire du 25 novembre 2013) 2014. http://www.driee.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/l-appovisionnement-energetique-du-r932.html.

[65] G. Pasaoglu, D. Fiorello, L. Zani, A. Martino, A. Zubaryeva, C. Thie. Projections for Electric Vehicle Load Profiles in Europe Based on Travel Survey Data 2013.

[66] Assoumou E, Marmorat J-P, Houel J, Roy V. Load curve impact of large electric vehicles fleet in the Paris Ile-de-France region. Chaire Modélisation prospective au service du développement durable; 2015.

[67] Nasiritousi N, Hjerpe M, Buhr K. Pluralising climate change solutions? Views held and voiced by participants at the international climate change negotiations. Ecol Econ 2014;105:177–84. doi:10.1016/j.ecolecon.2014.06.002.

[68] Jackson T. Live Better by Consuming Less?: Is There a "Double Dividend" in Sustainable Consumption? J Ind Ecol 2005;9:19–36. doi:10.1162/1088198054084734.

[69] Jaeger-Erben M, Rückert-John J, Schäfer M. Sustainable consumption through social innovation: a typology of innovations for sustainable consumption practices. J Clean Prod 2015;108, Part A:784–98. doi:10.1016/j.jclepro.2015.07.042.

[70] Mont O, Neuvonen A, Lähteenoja S. Sustainable lifestyles 2050: stakeholder visions, emerging practices and future research. J Clean Prod 2014;63:24–32. doi:10.1016/j.jclepro.2013.09.007.

[71] Outi Kuittinen, Roope Mokka, Aleksi Neuvonen, Mari Orjasniemi, Maria Ritola, Markus Wikholm. iFuture – The Diversity of Sustainable Lifestyles : D7.3 People's forum workshop summaries. 2012.

[72] UNEP. Visions for change: Recommendations for Effective Policies on Sustainable Lifestyles Based on the Global Survey on Sustainable Lifestyles (GSSL) 2011.

[73] Michelle Dobré, Aldo Haesler, Julien Onno, Nicolas Hossard. Modes de vie innovants et tactiques de résistance à l'accélération du rythme quotidien. 2014.

[74] Gallic TL, Assoumou E, Maïzi N, Strosser P. Les exercices de prospective énergétique à l'épreuve des mutations des modes de vie. VertigO Rev Électronique En Sci Environ 2015;14:[En ligne]. doi:10.4000/vertigo.15635.

[75] van Sluisveld MAE, Martínez SH, Daioglou V, van Vuuren DP. Exploring the implications of lifestyle change in 2 °C mitigation scenarios using the IMAGE integrated assessment model. Technol Forecast Soc Change 2016;102:309–19. doi:10.1016/j.techfore.2015.08.013.

[76] Angela Druckman, Tim Jackson. THE LOCAL AREA RESOURCE ANALYSIS (LARA) MODEL: CONCEPTS, METHODOLOGY AND APPLICATIONS RESOLVE Working Paper 02-07 n.d. http://resolve.sustainablelifestyles.ac.uk/sites/default/files/RESOLVE_WP_02-07.pdf (accessed April 14, 2017).

[77] Reveiu A, Smeureanu I, Dardala M, Kanala R. Modelling Domestic Lighting Energy Consumption in Romania by Integrating Consumers Behavior. Procedia Comput Sci 2015;52:812–8. doi:10.1016/j.procs.2015.05.137.

[78] Gallic TL, Assoumou E, Maïzi N. Investigating long-term lifestyles changes in France: a statistical and modelling approach, 2016.

[79] Gallic TL, Assoumou E, Maïzi N. Enhancing energy system models with a quantitative approach of future lifestyles, 2016.

[80] Assoumou E, Jerome G, Doudard R, Maïzi N. Prospects for future changes in the hourly CO2 emission factor of electricity generation: a case study for France, 2016.

[81] Roux C, Schalbart P, Assoumou E, Peuportier B. Integrating climate change and energy mix scenarios in LCA of buildings and districts. Appl Energy 2016;184:619–29. doi:10.1016/j.apenergy.2016.10.043.